

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie
zaměřením tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv teploty provozního prostředí na mechanické vlastnosti Al slitin

Operating Environment Temperature Influence on the Mechanical Properties of Aluminium Alloys

Kamil Hlinka

KSP – TP –

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: Michaela Kolnerová, Ph.D. - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	55
Počet tabulek	10
Počet obrázků	27
Počet příloh	9

Datum: 27. 5. 2011

A N O T A C E
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství
Student: Kamil Hlinka
Téma práce: Vliv teploty provozního prostředí na mechanické vlastnosti Al slitin

Operating Environment Temperature Influence on the
Mechanical Properties of Aluminium Alloys

Číslo BP: KSP – TP –
Vedoucí BP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*
Konzultant BP: Ing. Michaela Kolnerová, Ph.D. - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Automobilový průmysl je jedním z perspektivních a rychle se rozvíjejících odvětví. Z tohoto důvodu je nutné hledat takové materiály, které by splňovaly potřebné nároky. Především hliníkové slitiny představují široké spektrum materiálů vykazujících optimální vlastnosti vhodné pro aplikaci při konstrukci automobilu. V této souvislosti je nutné zkoumat mechanické vlastnosti těchto materiálů, které jsou při běžném provozu vystavovány různorodým vlivům prostředí. Bakalářská práce s názvem „Vliv teploty provozního prostředí na mechanické vlastnosti Al slitin“ se zabývá mimo jiné důležitou otázkou působení teploty na hliníkové slitiny.

Abstract:

The automotive industry is perspective and rapidly developing. It was the main reason why I am interested in this topic. It is necessary to seek materials which would meet the necessary requirements. Aluminum alloys represent a wide range of materials that have optimal features suitable for usage in automotive constructions. In this context it is necessary to examine the mechanical features of these materials which are exposed to various influence of environment in common running. Bachelor thesis entitled "Operating Environment Temperature Influence on the Mechanical Properties of Aluminium Alloys" is also focused on the temperature influence

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 27. května 2011

.....

Kamil Hlinka

Luční 138

435 32 Mariánské Radčice

Poděkování:

V úvodu bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Doubkovi Ph.D. a konzultantovi Ing. Michaele Kolnerové, Ph.D. za jejich odborné vedení, rady a věcné připomínky, díky kterým jsem se mohl lépe orientovat v celé problematice při vypracování předkládané bakalářské práce.



Obsah

1	ÚVOD	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1	Vlastnosti čistého hliníku a jejich slitin	12
2.2	Výhody použití slitin hliníku v automobilovém průmyslu	13
2.3	Nevýhody použití slitin hliníku v automobilovém průmyslu	13
2.4	Slitiny hliníku v používané při stavbě karoserie a v konstrukci automobilu. 14	
2.4.1	Slitiny určené k tváření	17
2.4.2	Slévárenské slitiny hliníku	20
2.5	Tepelné zpracování slitin hliníku a jeho slitin	24
2.6	Vliv teploty na vlastnosti hliníku a jeho slitin	25
2.6.1	Creep	25
2.6.2	Lomová houževnatost	27
2.7	Koroze hliníku a jeho slitin	27
2.8	Tváření hliníku a jeho slitin	29
2.8.1	Průtlačné lisování hliníku a jeho slitin za tepla.....	31
2.8.2	Válcování hliníku a jeho slitin	33
2.8.3	Ohýbání hliníku a jeho slitin	34
2.8.4	Tažení drátů, tyčí a trubek z hliníku a jeho slitin za studena	36
2.8.5	Kování hliníku a jeho slitin	38
2.8.6	Stříhání hliníku a jeho slitin	40
2.8.7	Další druhy tváření hliníku a jeho slitin	42



3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
3.1	Použitý materiál	43
3.2	Experimentální metoda	44
3.3	Příprava vzorků	44
3.4	Průběh zkoušky	45
3.5	Vyhodnocení	46
4	ZÁVĚR	47
5	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
6	SEZNAM PŘÍLOH	56

**Seznam použitých značek, veličin a jednotek**

Označení	Název	Jednotky
A	Tažnost	[%]
ČSN	Česká státní norma	-
EN	Evropská norma	-
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	-
K_{IC}	Lomová houževnatost při rovinné deformaci	[MPa·mm ^{1/2}]
R	Vnitřní poloměr ohybu	[mm]
R_e	Výrazná mez kluzu	[MPa]
R_m	Smluvní mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez pevnost	[MPa]
T	Teplota	[°C]
t	Tloušťka	[mm]
z	Hodnota střížné mezery	[mm]



1 ÚVOD

Hliník je třetím nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře. Podle posledních dostupných údajů tvoří hliník 7,5 – 8,3 % zemské kůry. Hliník se v přírodě nachází přibližně v 250 různých minerálech. Mezi nejdůležitější lze řadit korund, diaspor, kyanit, boehmit, nefelin, andaluzit, spinel, alunit, silimanit, kaolinit atd. Přestože hliník je třetí nejrozšířenější prvek v zemské kůře, jeho samotná výroba patřila k velmi obtížným procesům. Důvodem této skutečnosti je, že elementární hliník nelze jednoduše metalurgicky vyredukovat z jeho rudy, jako je tomu možno např. u železa pomocí koksu ve vysoké peci.

Počátek výroby hliníku se datuje k roku 1825, kdy Hans Christian Oersted pomocí redukce chloridu hliníku amalgámem draslíku získal malé množství hliníku. Dalším důležitým datem je rok 1886, kdy Francouz Paul Héroult a Američan Charles Hall objevili výrobu hliníku elektrolýzou, což představovalo důležitý krok v počátečním vývoji průmyslově vyráběného hliníku. O rok později, v roce 1887, byl hliník použit na střechu římsko-katolického kostela v Gioacchinu. Tehdy se jednalo o jeho první velké použití.

Uběhla další desetiletí od objevu Paula Heroulta a Charles Halla, než započala jeho první průmyslová výroba. Hliník byl produkován v malém množství a jeho cena byla velmi vysoká, dokonce vyšší než cena zlata. V tomto období byl hliník používán jen na speciální účely v klenotnictví. Největší nárůst výroby a využití hliníku nastal až po 2. světové válce.

V současnosti se hliník používá převážně v těchto oblastech:

- doprava zahrnující letecký a automobilový průmysl, kolejovou a lodní dopravu i kosmonautiku
- stavebnictví
- strojírenský a elektrotechnický průmysl
- potravinářský průmysl
- chemický průmysl
- rekreační průmysl a sport
- jiné oblasti použití (klenotnictví)



Tab. 1.1 Produkce primárního hliníku v letech 2007 – 2011 [v tisících tun] [20]

Rok	Afrika	Severní Amerika	Jižní Amerika	Asie	Západní Evropa	Střední a východní Evropa
2007	1,815	5,642	2,558	3,717	4,305	4,460
2008	1,715	5,783	2,660	3,923	4,618	4,658
2009	1,681	4,759	2,508	4,400	3,722	4,117
2010	1,742	4,689	2,305	2,500	3,800	4,253
leden až březen 2011	0,438	1,189	0,547	0,643	0,978	1,069

V tab.1.1 je uvedena produkce primárního hliníku za poslední léta. V České republice představuje automobilový průmysl hnací sílu technického rozvoje průmyslových oborů. Na dopravní prostředky jsou kladeny stále náročnější požadavky, jak na měrné výkony motorů, snižování spotřeby paliva, tak na profily pro výplně dveří, pouzdra tlumičů a další. To vede k potřebě používat materiály pro odlitky s vyššími mechanickými, fyzikálními a technologickými vlastnostmi. V současné době jsou v popředí především lehké kovy např. hliník, hořčík a jejich slitiny. Vývoj nových materiálů si vyžádal také vývoj nových technologií, které umožňují vytvořit specifické vlastnosti vyžadované při výrobě dílů a zařízení pro automobil. Příkladem může být metoda hydroforming nebo metoda conform, která je blíže popsána v kapitole 2.8.1.

Významný nárůst použití hliníku nastal v automobilovém průmyslu před 15 lety. V poslední době začal automobilový průmysl pracovat na nových řešeních automobilového designu, takže využití hliníku je především pro komponenty v automobilové karoserii [12].

Hliník a jeho slitiny se v automobilovém průmyslu využívají např. na kryt motoru, písty, skříň převodovky, chladiče, olejovou vanu, kola vozu, palubní desku, součást sedadel, vnitřní rámy dveří, ramena zrcátek, pro navíječe pásů, u stěračového systému, turbodmychadla, lité výrobky pro systém ovládání oken apod.

Nejčastěji se používají lité a tvářené výrobky. Z tvářených výrobků se při konstrukci automobilu nejvíce používají plechy a výlisky. V automobilové výrobě patří mezi nejčastěji používané technologie tváření např. protlačování, lisování, ohýbání apod. Největší podíl litých výrobků představují odlitky lité pod tlakem do kovových forem. Dále se používá lití do kokil, do písku, na vytavitelný model atd.



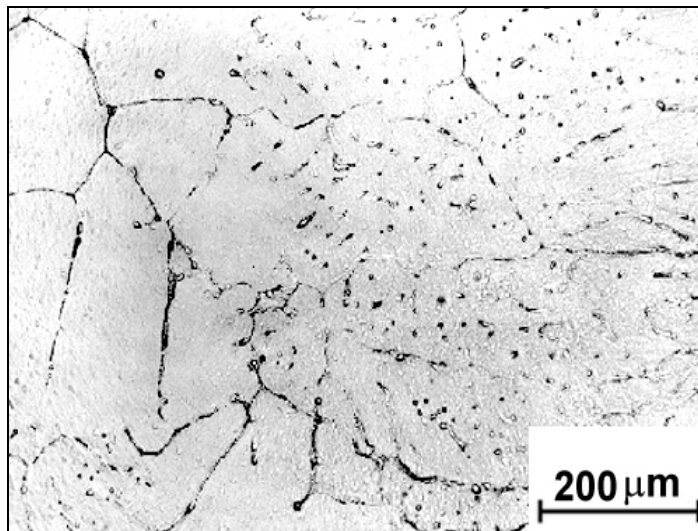
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Vlastnosti čistého hliníku a jejich slitin

Hliník, jehož struktura pod mikroskopem je zobrazena na obr. 2.1, je velmi lehký měkký kov s jednotvárným stříbřitým vzhledem. Mezi jeho vlastnosti patří vysoká elektrická a tepelná vodivost s poměrně vysokou hodnotou měrného tepla tání. Hliník má kubickou plošně centrovanou mřížku, je to nepolymorfni kov s atomovým číslem 13. Významnou vlastností hliníku je jeho poměrná stálost na vzduchu. Ke zjemnění zrna se přidává malé množství prvků, například Ti, Zr, Ta. Hliník a jeho slitiny se vyznačují vysokým poměrem meze pevnosti v tahu a hustoty. Čistý hliník má pevnost v tahu pod 100 MPa. Některé vlastnosti hliníku, zejména vlastnosti mechanické, lze ovlivňovat přidáváním různých legujících prvků do čistého hliníku. Vznikají tak hliníkové slitiny, což jsou obvykle tuhé roztoky s omezenou rozpustností [18]. Bližší informace o jednotlivých druzích hliníkových slitin jsou uvedeny v kapitole 2.4. V tabulce 2.1 jsou pro porovnání uvedeny vybrané vlastnosti hliníku a nízkouhlíkové oceli. V přílohách 1 a 2 jsou uvedeny typické hodnoty mechanických vlastností určených zkouškou tahem vybraných tvářených slitin hliníku při nízkých teplotách a vybraných tvářených slitin hliníku po 10 000 hodinách výdrže na teplotě zkoušky.

Tab. 2.1 Vybrané vlastnosti čistého hliníku ve srovnání s nízkouhlíkovou ocelí
[13]

Vlastnosti	Jednotka	Hliník	Nízkouhlíková ocel
Hustota při 20 °C	$[kg \cdot m^{-3}]$	2699	7850
Hustota při teplotě tavení		2380	7000
Teplota tavení	$[^{\circ}C]$	660	1530
Tepelná vodivost při 20 °C	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	229	53
Tepelná roztažnost	$[^{\circ}C^{-1} \cdot 10^{-6}]$	23,8	12
Elektrická vodivost	$[S]$	35	8
Pevnost v tahu	$[MPa]$	70-100	300-400
Tažnost	$[\%]$	30-40	30-35



Obr. 2.1 Struktura čistého hliníku Al 99,99 %po tváření za studena pod mikroskopem

2.2 Výhody použití slitin hliníku v automobilovém průmyslu

Co se týče automobilového průmyslu, pak můžeme za jednu z nejdůležitějších výhod hliníku považovat jeho svařitelnost, neboť je nutné materiály při sestavování automobilu spojovat. Další výhodou může být jeho nízká hmotnost a použití při nízkých teplotách, stejně tak odolnost proti atmosférickým vlivům, jelikož automobily jsou vystavovány v průběhu roku rozdílným teplotám a počasí. V dnešní době je z ekologického hlediska důležitá i možnost recyklace hliníku. Jako charakteristickou vlastnost tohoto prvku je možno uvést jeho houževnatost.

2.3 Nevýhody použití slitin hliníku v automobilovém průmyslu

Právě vysoká hodnota houževnatosti hliníku je v rozporu s jeho tvrdostí. Hliník je málo tvrdý a právě při používání osobního automobilu, může snadno dojít k povrchovým defektům, „zhmoždění“ materiálu. I když má hliník nízkou hmotnost, což lze považovat za výhodu, na druhou stranu má nízkou nosnost, což může být v automobilovém průmyslu problémem. Za velkou nevýhodu lze považovat možnost napadení materiálu elektrochemickou korozí, je-li konstrukce ve vodivém styku s ostatními kovy a slitinami, stejně tak hliník není odolný proti hydroxidům.



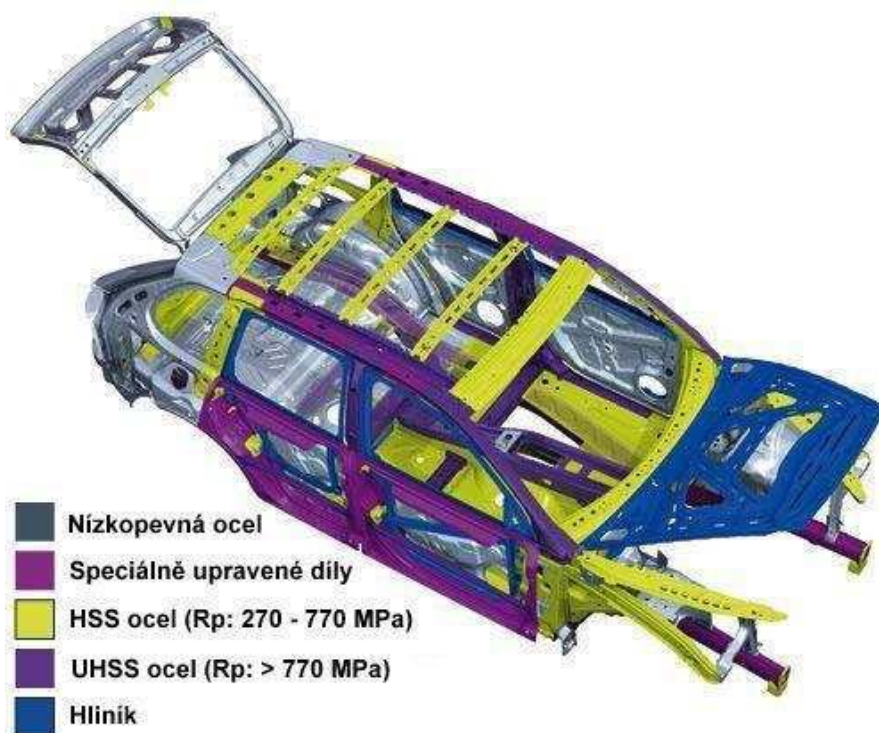
2.4 Slitiny hliníku v používané při stavbě karoserie a v konstrukci automobilu.

Hliník jako samotný prvek se v automobilovém průmyslu nepoužívá vzhledem k jeho vlastnostem uvedených výše v kapitole 2.1. V konstrukci automobilů se používají slitiny hliníku. Prvky vyskytující se v hliníkových slitinách jsou měď, hořčík, mangan, křemík, titan a zinek. Tyto prvky zvyšují fyzikálně-chemické a mechanické vlastnosti hliníku.

Především díky své nízké měrné hmotnosti $2\,700\text{ kg/m}^3$, dobré tvárnosti a vysoké odolnosti proti korozi jsou materiály na bázi hliníku aplikovány při konstrukci karoserií osobních automobilů jako alternativa ke konvenční oceli. Vzhledem k tomu, že mechanické vlastnosti hliníkových slitin jsou v porovnání s oceli nižší, nelze pouze nahradit ocelové plechy karoserie hliníkovými. Hmotnost takové karoserie by sice klesla na přibližně jednu třetinu, ale výrazně by poklesla její tuhost. [22]. Na obr. 2.2 lze vidět využití různých materiálů v konstrukci osobního automobilu.

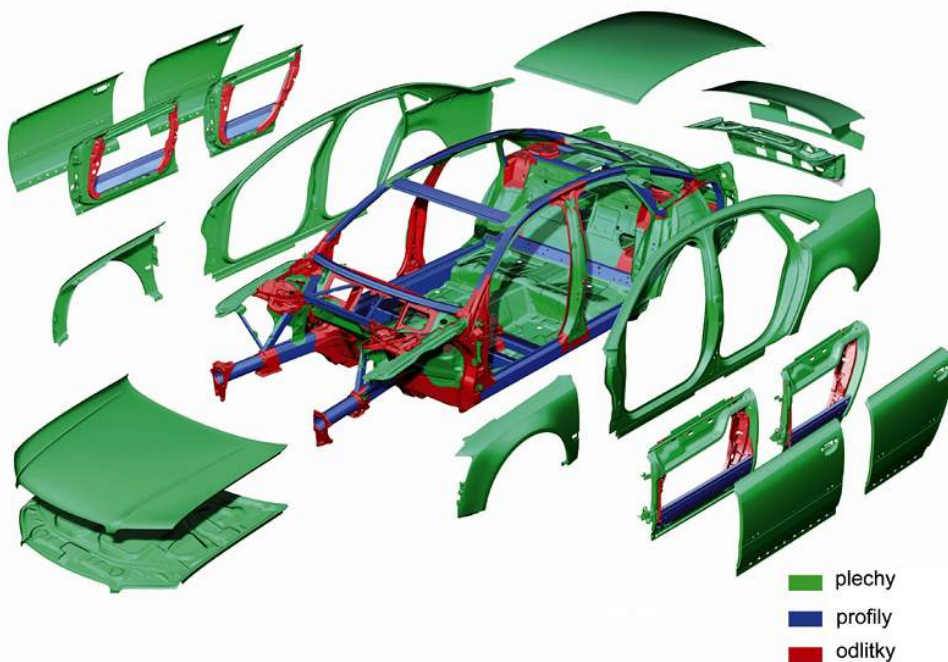
Řešení konstrukce hliníkové karoserie u Audi, automobilky s největším počtem sériově vyrobených a prodaných vozů s celohliníkovou karosérií, spočívá v použití nosného prostorového rámu (tzv. Audi Space Frame), který je možno vidět na obr. 2.3. Automobilka uvádí, že hliníkový prostorový rám luxusní limuzíny A8 má hmotnost 249 kilogramů, což je zhruba o 200 kg méně, než je obvyklá hmotnost ocelové karoserie automobilu stejné velikosti, v případě karoserie malého modelu A2 uvádí Audi úsporu hmotnosti 43 % [23].

I přes některé odhady z druhé poloviny minulého století, že hliník při stavbě karoserií automobilů brzy nahradí ocel, jsou dodnes celohliníkové karoserie doménou spíše dražších luxusních a sportovních vozů, neboť zákazníci zatím nejsou příliš ochotni připlácet si za výhody, které jim celohliníková karoserie může přinášet. Předpokládá se, že do budoucna celkově podíl hliníkových slitin v automobilu dále poroste, i přesto, že je v některých aplikacích nahrazován prudce se rozvíjejícími technickými plasty.



Obr.

2.2 Využití různých materiálů v konstrukci automobilu

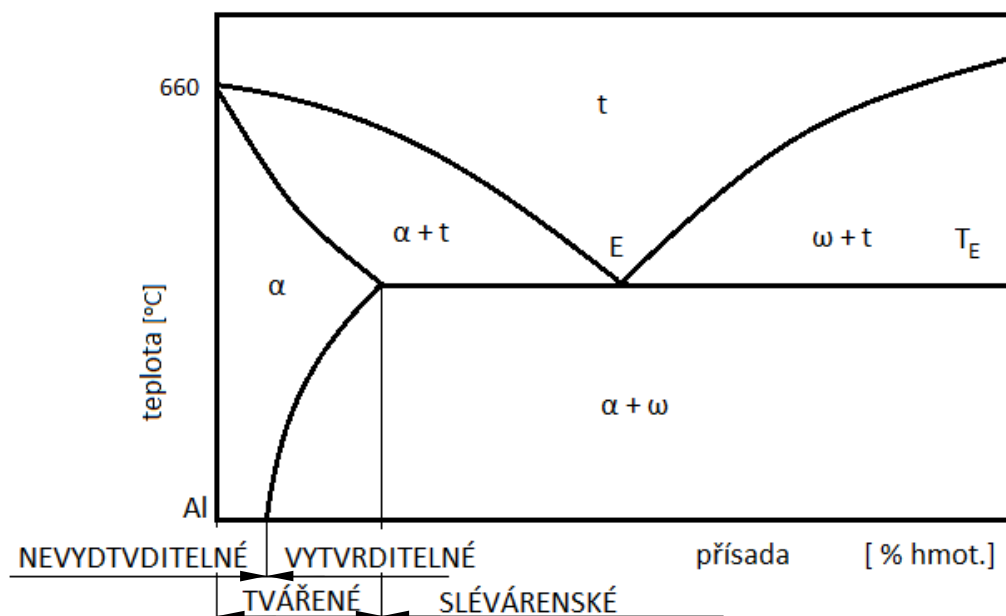


Obr. 2.3 Audi Space Frame u luxusního modelu A8 [22]



Slitiny hliníku lze dělit podle různých kritérií, nejčastěji podle způsobu zpracování na slitiny tvářené a slitiny pro odlitky.

Na obrázku 2.4 je uveden rovnovážný diagram binárních slitin hliníku, který lze použít pro ilustraci možného rozdělení hliníkových slitin.



Obr. 2.4 Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku

Hliníkové slitiny jsou poměrně málo legovány. Obsah jednotlivých prvků u tvářených slitin nepřesahuje obvykle 5 až 7 % a součet obsahů všech legovacích prvků je zpravidla menší než 10 % [7].



2.4.1 Slitiny určené k tváření

Slitiny určené k tváření lze dělit na:

- slitiny s vyšší a vysokou pevností s nízkou odolností proti korozi (slitiny typu Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu)
- slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi (zejména slitiny Al-Mg, Al-Mn)

Pro lepší představu o hodnotách pevnosti u tvářených slitin je uvedena tab. 2.2.

Tab. 2.2 Hodnota meze pevnosti u vybraných tvářených hliníkových slitin [9]

Slitina	Pevnost R_m [MPa]
AlMg3	200 - 400
AlMn1	110 - 200
AlCu4Mg	400 - 480
AlCuNi	400 - 450
AlMgSi1	nevytvrzené 110 – 200
	vytvrzené 280 – 330

2.4.1.1 Slitiny s vyšší a vysokou pevností

Slitiny s vyšší a vysokou pevností jsou nejvíce používanými materiály v leteckém a automobilovém průmyslu, viz obr. 2.5. Do této skupiny patří slitiny hliníku na bázi Al-Cu a Al-Cu-Mg. Tyto slitiny jsou zejména známy pod obchodním názvem duraly. Přídavek niklu zvyšuje pevnost těchto slitin za tepla, takže se používají především na výkovky pracující za vyšších teplot, např. na písty spalovacích motorů. Pro zjemnění zrna se přidává titan. Jejich nevýhodou je omezená svařitelnost, omezená svařitelnost za studena i horší třísková obrobiteľnost (tu lze zlepšit přidáním olova nebo bismutu) [7].



Obr. 2.5 Hliníková karoserie automobilu Audi A8

Slitiny Al-Cu a Al-Cu-Mg (duraly)

Obvyklé chemické složení slitiny Al-Cu je následující: 3,8 až 4,8 % Cu; 0,5 % Mg; 0,5 % Mn a méně než 0,7 % Si. Slitina Al-Cu-Mg obsahuje 3,5 až 4,5 % Cu; 1,2 až 1,8 % Mg; 0,5 % Mn a méně než 0,5 % Si. U těchto slitin lze dosáhnout vysoké pevnosti (až $R_m = 530$ MPa) a tažnost A_5 se pohybuje v rozmezí 10 – 15 % [1]. Nevýhodou těchto slitin je jejich nízká odolnost proti korozi. Pro zvýšení korozivzdornosti slitiny se přidává Mn. Plechy nebo výlisky vyrobené z těchto slitin se pokrývají vrstvičkou čistého hliníku (plátované duraly). Použitelnost slitin Al-Cu-Mg je až do 150 °C, s přísadou Ni (1–2 hm. %) až do 300 °C. Zástupci těchto slitin (AlCu4Mg, AlCu4Mg1 a AlCu4Mg1Mn) se používají na konstrukci částí karoserií vozidel (kapota obr. 2.6, dveře) a letadel (nosné prvky křídel a tubusů) [14].

Slitiny Al-Cu a Al-Cu-Mg (Avial)

Tyto materiály jsou legovány především hořčíkem. Obsah Cu je nižší než u duralu typu AlCu a obsah křemíku (0,31 %) je naopak mírně zvýšený. Kromě hliníku obsahují např. 0,6 % Mg; 0,67 % Si; 0,11 % Fe; 0,08 % Cu. Slitiny vykazují nižší pevnostní úroveň než duraly, ale vyšší plasticitu jak při normální, tak i zvýšené teplotě. Jsou dobře svařitelné v inertních ochranných atmosférách a vyznačují se dobrou korozivzdorností i úrovní proti únavovému porušení.

Slitiny typu Avial se vytvrzuje z teploty cca 520 °C do vody a následně se zpevňují buď stárnutím přirozeným, nebo umělým (při teplotě 160 °C po dobu 12 hodin). Slitina Avial je vhodná pro výrobu plechů, profilů trubek atd. Používá se na konstrukční díly, které nejsou mimořádně pevnostně namáhány a kde je vyžadována vysoká plasticita (za normální i zvýšené teploty) [1].



Obr. 2.6 Hliníková kapota s průduchem pro chlazení Subaru Legacy

2.4.1.2 Slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi

Do této podskupiny patří slitiny Al-Mg a Al-Mn. Základní typy těchto slitin se legují hořčíkem (u variant od 1,8 až do 7 % neklesá tažnost) a manganem (od 0,2 do 1,6 % vytváří fázi typu Al₆Mg). Vyznačují se dobrou odolností proti korozi i bez povrchové ochrany, důvodem je absence mědi ve slitině. Mezi výhody těchto slitin patří jejich svařitelnost, tvářitelnost, odolnost proti vibračnímu zatížení a dobrá lomová houževnatost. Naopak jejich nevýhodou je, že je nelze podstatně vytvrdit tepelným zpracováním, což je zapříčiněno absencí mědi. Ztížena je také obrobiteľnosť.

Používají se pro konstrukční díly s požadavkem zvýšené korozní odolnosti a nižší úrovní mechanického namáhání jako jsou např. zásobníky benzínu, potrubí apod. Konstrukční díly, u nichž je zvýšený požadavek na pevnostní vlastnosti, jsou legovány horními obsahy Mn a Mg. Pevnost se pohybuje (dle varianty) od 200 do 400 MPa a tažnost od 10 do 23 % [1].

Slitiny Al-Mg

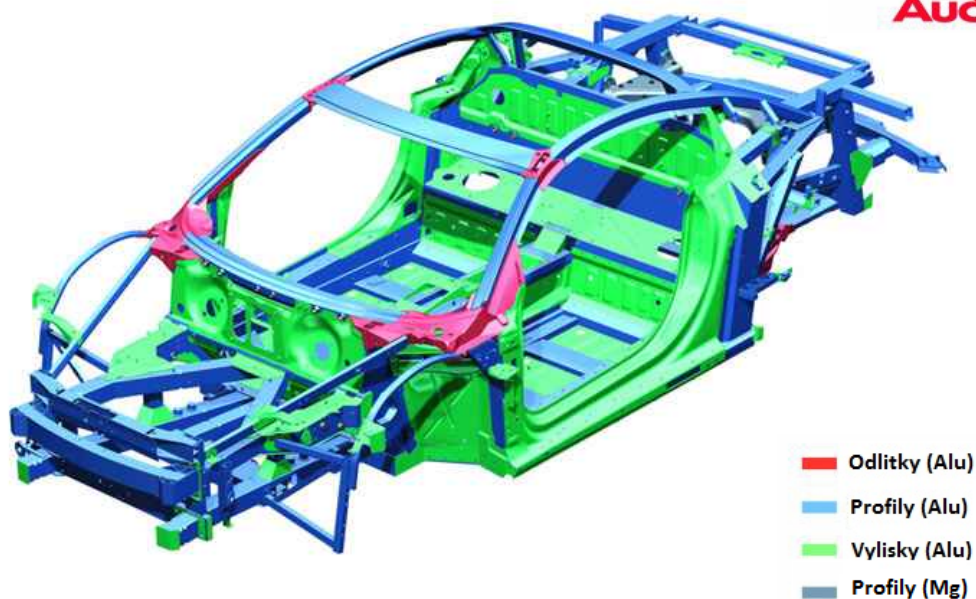
Tyto slitiny obsahují hořčík do 6 hm. %, což umožňuje výbornou odolnost proti korozi. Menší pevnostní charakteristiky těchto slitin lze zvýšit deformačním zpevněním, využívá se to zejména u slitin AlMg5. Jsou využívány především v automobilovém průmyslu na části karoserie vozidel. Další zástupci těchto slitin AlMg2, AlMg3 a AlMg6 jsou používány v potravinářském a chemickém průmyslu (obaly, nádoby, plechy) [14].



Slitiny Al-Mg-Si

V leteckém průmyslu jsou používány především slitiny Al-Mg-Si na kabiny letadel a vrtulníků. V automobilovém průmyslu je využívám pro tvářené profily obr. 2.7. Na rozdíl od Al-Mg lze je mírně vytvrdit tepelným zpracováním. Slitina je dobře tvárná, svařitelná a korozivzdorná.

Audi R8 Space Frame



Obr. 2.7 Zastoupení tvářených profilů v konstrukci automobilu Audi R8

2.4.2 Slévárenské slitiny hliníku

Slévárenské slitiny se převážně používají na díly motorů, např. píst (viz obr. 2.8), blok a sání motoru, nápravy automobilů, oběžné kolo turbodmyhadla, hliníkové disky aut atd.

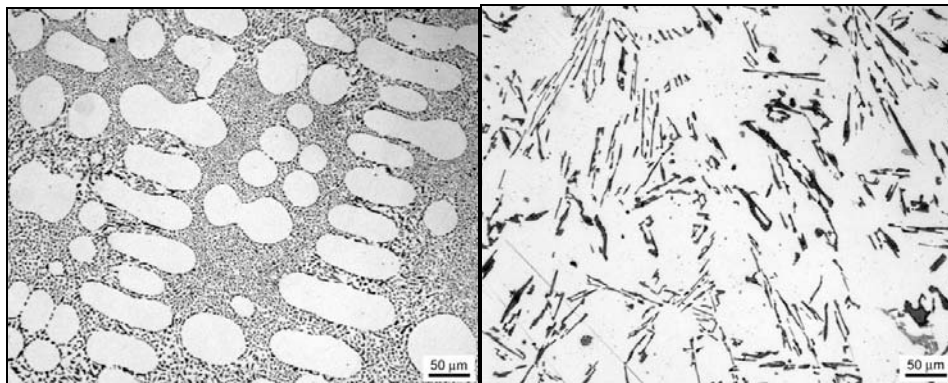


Obr. 2.8 Píst spalovacího motoru ze slitiny hliníku

Nejrozšířenější skupinou slévárenských slitin jsou slitiny Al-Si, tzv. siluminy. Siluminy lze dále rozdělit podle množství křemíku na podeutektické 4,5 – 10 % Si, eutektické 10 - 13 % Si, nadutektické nad 13 % Si.

Jedná se o slévárenské slitiny, kde křemík zvyšuje tekutost hliníku. Jako přísady se používají Cu, Ni, Mg, Mn Ni atd. Pro zjemnění zrna, a tím dosažení vyšších mechanicko-metalurgických vlastností se přidává Ti, Zr, B a V. Siluminy jsou určeny k výrobě tvarových odlitků litím do písku, do kovových forem nebo za použití tlaku.

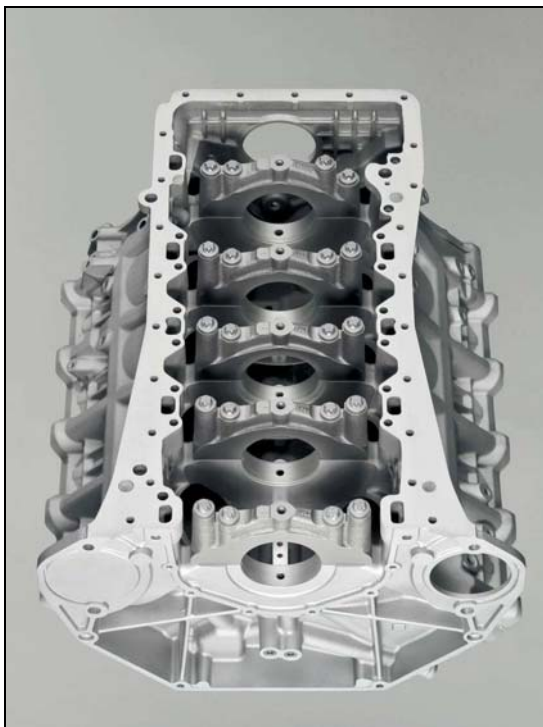
Tyto materiály vykazují nízkou pevnost, ale dobrou odolnost proti korozi. Hodnoty mechanických vlastností odlitků značně závisí na způsobu odlévání, maximální pevnost bývá přibližně 250 MPa. Nízké mechanické vlastnosti způsobuje přítomnost křehkých krystalů křemíku. Pevnost a současně i tvárnost siluminů lze zlepšit modifikací, což lze vidět na obr. 2.9 - a, 2.9 - b), z níž vyplývá tvorba jemných krystalků křemíku. K této modifikaci se nejčastěji používá sodík nebo stroncium v množství 0,02 – 0,04 %. Na zlepšení pevnostních charakteristik binárních siluminů mají také zásluhu přísady hořčíku a mědi, popřípadě mangan, zinek, nikl nebo titan [14].



Obr. 2.9 - a Modifikovaný silumin. Obr. 2.9 - b - Nemodifikovaný silumin.

Slitiny Al-Cu

Obsah mědi ve slitinách Al-Cu je obvykle mezi 4–5 %, dále obsahují další přísady, nejčastěji železo a nikl. S hliníkem tvoří sloučeniny disperzně zpevňující tuhý roztok. Tepelným zpracováním lze dosáhnout zlepšení jejich pevnostních vlastností vůči litému stavu. Vyrábějí se také slitiny s obsahem 9–11 % mědi. Charakterizují se dobrými pevnostními vlastnostmi za vyšších teplot, čehož lze docílit přidáním niklu a hořčíku. Nevýhoda oproti siluminům je, že mají horší slévárenské vlastnosti a nízkou korozní odolnost. Používají se zejména na namáhané odlitky pro vyšší teploty, jako jsou hlavy válců nebo turbíny. Dále nachází použití na odlitky s vysokými nároky na pevnost např. převodové skříně, bloky motorů obr. 2.10 a hlavy válců obr. 2.11. Nejznámější slitiny jsou AlCu4MgTi (4,2 – 5,0 % Cu, 0,15 – 0,35 % Mg, 0,15 – 0,35 % Ti), AlCu4Ni2Mg2 (3,75 – 4,5 % Cu, 1,75 – 2,25 % Ni, 1,25 – 1,75 % Mg) [14].



Obr. 2.10 Blok vznětového motoru V8 ze slitiny hliníku



Obr. 2.11 Detail vznětového motoru 3.0d 180kW hlava válců a blok motoru je ze slitiny hliníku s použitím litinových vložek válců, víko hlavy je vstříkované z technického plastu

Slitiny Al-Mg

Tyto slitiny se charakterizují velmi dobrou odolností vůči korozi především v mořské vodě. Ze slévarenských slitin hliníku mají nejvyšší měrnou pevnost a houževnatost a oproti siluminům lepší mechanickou obrobiteľnost a lze je svařovat. Nevýhody této slitiny jsou horší slévatelnost, větší pórovitost a tendence hořčíku k oxidaci v procesu tavení. Přísadou křemíku můžeme zlepšit zabíhavost. Pokud je vyžadovaná lepší odolnost proti korozi, dodává se jako přísada zinek. Slitiny se výborně eloxují. Pro zvýšení mechanických vlastností se přidává Ti a Zr.

Slitina Al-Mg-Si se nejvíce používá na mechanicky namáhané odlitky za vyšších teplot, nebo odlitky vystavené povětrnostním vlivům, ozdobné prvky aut, součástky pro kancelářské stroje. Používá se slitina AlMg5Si1Mn (4,40 – 5,50 % Mg, 0,60 – 1,50 % Si, 0,25 – 0,6 %) a slitina AlMg10SiCa (7,00 – 10,00 % Mg, 0,01 – 2,00 % Si, 0,01 – 0,15 % Ca) [14].



2.5 Tepelné zpracování slitin hliníku a jeho slitin

Ve smyslu ČSN 42 0056 lze *tepelné zpracování hliníku a jeho slitin* definovat jako pochod, při kterém jsou výrobek nebo jeho část v tuhém stavu podrobeny jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury [13].

Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin můžeme rozdělit do 2 skupin:

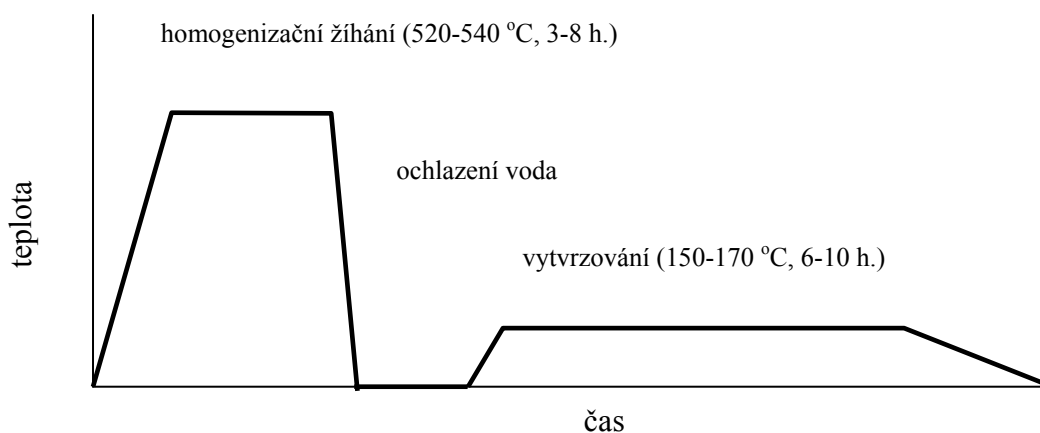
- Žíhání
- Vytvrzování

Pro zvýšení mechanicko-metalurgických vlastností u hliníkových slitin je nutné provést tepelné zpracování. Nejčastěji se realizuje proces vytvrzování, který je uveden na obr. 2.12. Skládá se z následujících pochodů.

Rozpouštěcího žíhání, což je ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu, výdrž na této teplotě po dobu nutnou k rozpuštění intermetalických fází (např. CuAl_2) do tuhého roztoku a následné rychlé ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí k získání přesyceného tuhého roztoku.

Kritická rychlost- nejmenší rychlost ochlazování, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku.

Stárnutí se provádí následně po ochlazení. Může být přirozené, tj. stárnutí probíhá při normální teplotě dlouhodobě (několik dnů) nebo umělé, tj. za zvýšených teplot. Při procesu stárnutí dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku, což vede ke zvýšení mechanických a fyzikálních vlastností hliníkových slitin [1].



Obr. 2.12 Postup vytvrzování



2.6 Vliv teploty na vlastnosti hliníku a jeho slitin

Provozní podmínky, ve kterých zařízení pracují, ovlivňují jejich celkovou životnost, ať už se jedná o zařízení zhotovené z hliníku a jeho slitin nebo z jiných materiálů. Při provozu hraje kromě jiných degradačních mechanismů značnou roli teplota pracovních prostředí. Se vzrůstající teplotou se mění vlastnosti použitého materiálu, např. lomová houževnatost je funkcí teploty a při návrhu zařízení je nutné stanovit tranzitní teplotu a z té vyplývající dovolenou pracovní teplotu. Zvýšení provozní teploty nám snižuje životnost daných zařízení.

Obecně lze říci, že mechanické vlastnosti se mění v závislosti na teplotě. U hliníkových slitin dochází k tomu, že při zvyšující se teplotě rychle klesá mez pevnosti R_m , mez $R_{p0,2}$ a tvrdost, samozřejmě tímto se zvyšuje tažnost a kontrakce. Pokud je materiál při zvýšených teplotách navíc pod stálým zatížením, dochází k jeho deformaci, samozřejmě se zvyšující se teplotou a rostoucím napětím dochází k rychlejší deformaci. Z toho vyplývá, že i při napětích nižších, než je mez $R_{p0,2}$, může docházet po určité době ke změnám vedoucím k lomu. Také stárnutí materiálu je děj spojený se změnou vlastností vyvolaných tepelně aktivovanými procesy. I z dlouhodobého hlediska má působení teploty velký význam, jako příklad lze uvést creep materiálu. Mezi další degradační mechanismy pracovních zařízení patří např. únava materiálu, zmíněná koroze, tření a opotřebení funkčních povrchů, radiační poškození, eroze apod. Na následujících řádcích bude uveden stručný přehled základních informací o creepu a lomové houževnatosti.

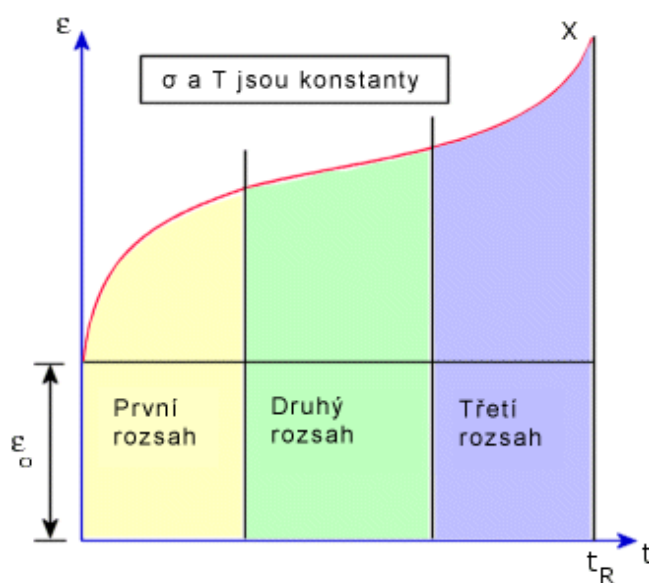
2.6.1 Creep

Creep (tečení) nebo také časově závislá složka nevratné plastické deformace je u konstrukčních materiálů vyvolán dlouhodobým působením napětí za zvýšených teplot [6].

Závislost velikosti plastické deformace a napětí se nazývá křivka tečení a její průběh můžeme rozdělit na tři oblasti, lišící se mezi sebou rychlostí deformace [7]. Křivka tečení je uvedena na obr. 2.13 První část křivky I, ve které po okamžité deformaci vyvolané zatížením rychlost tečení s časem klesá, se nazývá primární nebo tranzitní tečení. Po určité době dosáhne rychlost tečení nulové hodnoty. Oblast křivky II, v níž je rychlost tečení konstantní a nenulová, nazýváme sekundárním nebo stacionárním tečením. Je charakterizováno rovnováhou mezi zpevňováním a



zotavováním a probíhá při vyšších teplotách, kdy je dostatečná rychlost zotavování. V závěru se rychlost tečení zvětšuje s časem a nastává třetí stadiu, tzv. terciární tečení. Vzrůst rychlosti je způsoben zvětšením napětí, což se děje buď zmenšováním průřezu vzorku kontrakcí, vznikem mezikrystalických kavit nebo trhlin, anebo metalurgickými změnami struktury. Třetí stadium tečení končí lomem. Slitiny hliníku s ohledem na creep lze použít do 200 až 300 °C s napětím do 100, popř. do 20 MPa [7].



Obr. 2.13 Křivka tečení (creepu) [19]

S ohledem na creep u hliníkových slitin lze konstatovat, že obsah niklu zvyšuje pevnost při vyšších teplotách a hořčík a měď zajišťují vytvrditelnost. V tabulce 2.3 jsou uvedeny hodnoty meze tečení u vybraných hliníkových slitin.



Tab. 2.3 Hodnoty meze tečení slévarenských slitin hliníku [7]

Typ slitiny	$\sigma_{Tt 0,2/1000}$ při teplotě [MPa]			
	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C
AlCu5Ni3Mg	137	90	49	17
AlSi5Cu3	68	63	47	20
AlSi10Mg	116	53	27	13
AlSi12CuNiMg	-	91	38	14
AlSi2Cu1Ni1	-	70	50	24

2.6.2 Lomová houževnatost

Lomovou houževnatost jako materiálovou vlastnost můžeme definovat jako odpor materiálu proti šíření trhliny [8].

Z literárních zdrojů bylo zjištěno, že u hliníkových slitin se hodnoty lomové houževnatosti určovaly pro slitiny typu Al-Zn-Mg a Al-Cu-Mg. V závislosti na složení a tepelném zpracování se dosáhlo hodnot K_{IC} v rozsahu 785 až 1765 MPa·mm^{1/2}. Nejběžnější hodnoty jsou kolem 1000 MPa·mm^{1/2} [17]. Hodnoty lomové houževnatosti hliníkových slitin jsou závislé především na složení slitiny, způsobu výroby, tepelném zpracování a obsahu nečistot. Poměrně příznivých hodnot lomové houževnatosti u hliníkových slitin lze dosáhnout i při nízkých teplotách -190 °C.

2.7 Koroze hliníku a jeho slitin

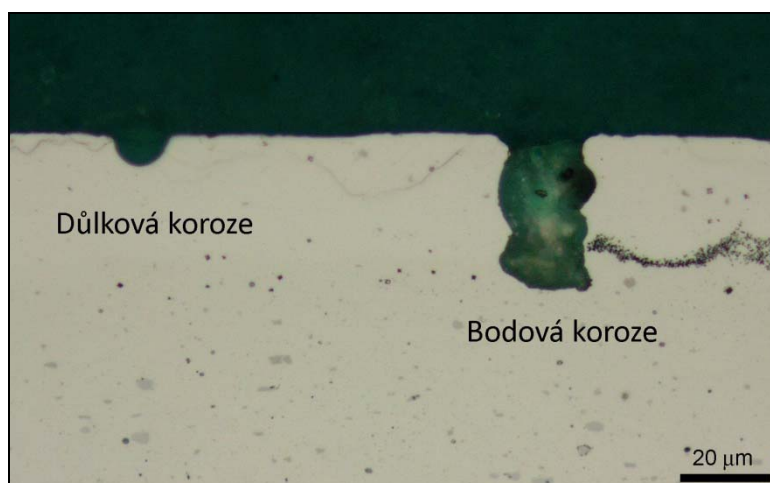
Přestože hliník a jeho slitiny lze řadit mezi kovy neušlechtilé, u nichž je korozní odolnost menší, je nutné podotknout, že ve většině případů vykazují dobrou odolnost proti korozi. Je to zapříčiněno reaktivností s kyslíkem. Působením vzdušného kyslíku se na povrchu hliníku vytváří velmi slabá oxidická vrstvička (v podstatě Al₂O₃), která vzhledem ke svým vlastnostem zabraňuje další korozi kovu. Některé chemikálie, např. roztoky alkalických louhů, kyseliny solné apod., tuto oxidickou vrstvu rozpouštějí a kov je pak velmi rychle napadán [4]. Příčinou koroze jsou samovolně probíhající děje mezi hliníkem nebo jeho slitinami a prostředím.



Korozi materiálů ovlivňují také různé druhy činitelů, mezi které patří především chemické složení materiálu i prostředí, v němž materiál pracuje, jeho struktura, stav povrchu materiálu, povrchové úpravy a konstrukce zařízení, kdy např. štěrby a různé defekty v materiálu mohou být potencionálními místy vzniku a rozvoje koroze. Značný vliv na korozi má také teplota, jelikož s rostoucí teplotou tvorba koroze ve většině prostředí stoupá a při varu dosahuje maxima. U hliníkových slitin se nejběžněji vyskytují tyto typy koroze:

- rovnoměrná koroze,
- bodová koroze, (tento druh koroze lze vidět na obr. 2.14)
- skvrnitá koroze,
- důlková koroze, (tento druh koroze lze vidět na obr. 2.14)
- koroze po vrstvách,
- interkrystalová a transkrystalová koroze [5].

Korozní odolnost hliníku lze zvýšit anodickou oxidací (eloxováním) [9]. Eloxování je elektrolytické vytvoření vrstvy Al_2O_3 , která se dá zbarvit, což umožňuje dosažení vhodných estetických účinků. Z estetických důvodů je možno povrch některých materiálů leštit [10]. Další obranou proti korozi mohou ochranné povlaky a nátěry.



Obr. 2.14 Bodová a důlková koroze u hliníkové slitiny



2.8 Tváření hliníku a jeho slitin

Jedna z nejdůležitějších vlastností hliníku je právě jeho tvářitelnost. „Tvařitelnost je tedy schopnost tvářeného tělesa se plasticky deformovat za obecných podmínek tváření bez porušení celistvosti materiálu.“[2]. Na obr. 2.15 je uvedeno schematické rozdělení tváření hliníkových materiálů vztahované k této práci.

Tváření je výrobní proces, ve kterém je pevný materiál deformován řízeným způsobem za účelem získat změny tvaru, rozměru a fyzikálních vlastností. Při tváření se působením vnějších sil mění tvar, aniž by se porušila celistvost materiálu, tzn., že částice materiálu se pouze trvale přemísťují. Toto přemístění je umožněno kovovou vazbou atomů, která zůstává zachována, probíhá-li tváření za optimálních podmínek. Technologická tvařitelnost specifikuje již určité podmínky tváření (válcování, kování, tažení, protlačování) v daných technologických podmínkách konkrétní technologie tváření (vliv teploty a rychlosti deformace a dále stav napjatosti, chemické složení materiálu, stupeň deformace a podmínky tření mezi nástrojem a materiálem). K tváření je proto výhodný materiál s nízkou pevností (mezi kluzu) a vysokou tažností materiálu. Při různých technologických pochodech tváření dochází k různým přetvořením. Při tlakových deformacích, jako je například válcování, lisování a kování, dochází k největšímu přetvoření, naopak při tahovém napětí získáme menší přetvoření. Tváření se děje buď působením klidných sil (válcováním, lisováním apod.), nebo rázy (kováním, nýtováním apod.), a to za studena nebo za tepla. Tvářením za studena se výsledkem těchto dějů zvyšuje pevnost a tvrdost a úměrně snižuje plasticita a houževnatost materiálu. Největší vzestup pevnosti nastává na počátku deformace do velikosti deformace 30 – 40 %. Zpracování není v celém průřezu zcela rovnoměrné, vznikají nebezpečná vnitřní napětí, která mohou porušit materiál. [3]

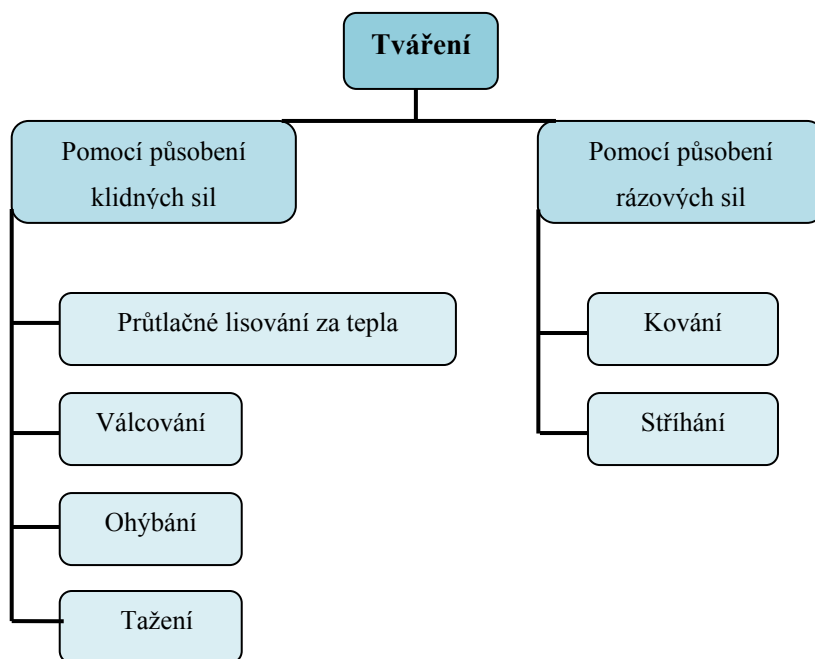
Obecně metoda tváření má vysokou produktivitu (sériová až hromadná výroba) a v určitých oblastech je i ekonomicky výhodná. Využití materiálu je velmi hospodárné, s nejmenším možným odpadem. Při obrábění odpadá průměrně až 50% materiálu, ovšem při tváření je to pouze 5 až 10 %. Dále také zlepšuje struktury a vlastnosti tvářeného materiálu.



Zpracovávání plechů z hliníkových slitin (lisování) je již stárnutím materiálu značně ovlivněno. Vlivem přirozeného stárnutí materiálu dochází k výrazným změnám mechanických vlastností, mění se poměr meze kluzu a meze pevnosti a roste tvrdost. To je způsobeno blokováním dislokací produkty precipitace, které se snaží zaujmout výhodnější energetické pozice. Důsledkem stárnutí materiálu je vznik Lüdersových čar na povrchu plechu při tváření za studena. Jejich vznik má velký vliv na povrchovou jakost výlisků, a proto se plechů ze slitin Al-Mg používá na díly, u kterých nevadí drobné povrchové (pohledové) vady. Podle místa vzniku jsou rozlišovány dva druhy Lüdersových čar [16]. V oblasti meze kluzu vznikají Lüdersovy čáry typu A a v oblasti rozvinuté plastické deformace mohou vzniknout Lüdersovy čáry typu B, které s rostoucí velikostí přetvoření rostou.

Obecně lze konstatovat, že Lüdersova prodleva je důsledkem deformačního stárnutí. Vlivem přirozeného stárnutí dochází k výrazným změnám mechanických vlastností. Především se zvyšuje mez kluzu a mez pevnosti. Následkem stárnutí materiálu se ovšem snižuje tažnost materiálu.

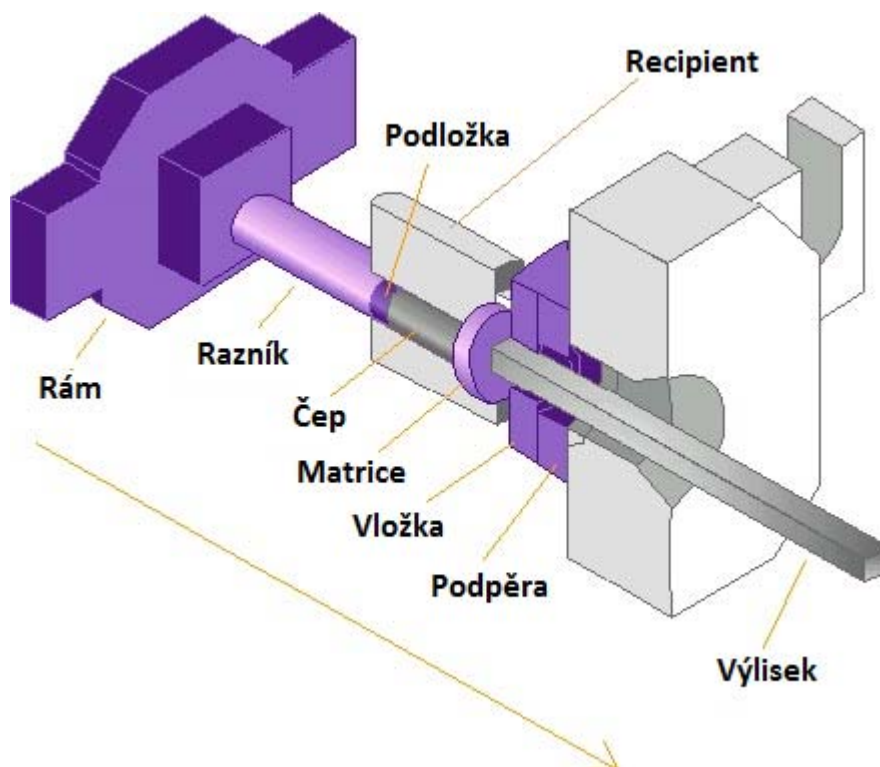
Rozdělení technologie tváření hliníku



Obr. 2.15 Schéma rozdělující technologii tváření podle způsobu působící síly na materiál vztahené k metodám uvedeným v této práci

2.8.1 Průtlačné lisování hliníku a jeho slitin za tepla

Tato metoda je nejvíce využívaná metoda tváření hned za technologií válcování. Průtlačné lisování obr. 2.16 umožňuje při poměrně malém počtu operací, získávat různé typy výlisku s jednoduchým nebo složitým průřezem, dále také umožní vysokou přesnost, kvalitu povrchu s možností rychlé změny sortimentu. Nevýhoda spočívá ve větší předváze, z důvodu nemožnosti vylisovat celý objem materiálu, dále určitá omezení v délce výlisku a relativně krátká životnost lisovacích nástrojů. Lisovatelnost hliníku a jeho slitin je závislá na chemickém složení materiálu, struktuře, na způsobu lisování a teplotě. Obecně nelze lisovat pouze jednou univerzální metodou, ale využívá se celá řada variant lisování. To je způsobeno rozdíly mezi jednotlivými hliníkovými slitinami (odlišné mechanismy zpevnění, specifické požadavky na tvar, vlastnosti, hmotnost konečného produktu apod.). Po samotném lisování velmi často přicházejí na řadu další operace napomáhající docílení požadavků na finální výrobek. Mezi tyto operace patří např. žíhání, úprava konečných rozměrů, obrábění apod. Kromě metody průtlačného lisování se využívá lisování hydrostatické popř. speciální postup s názvem Conform.



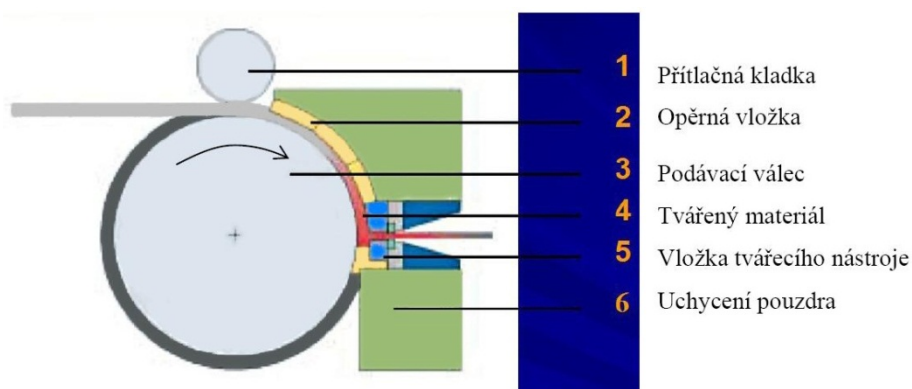
Obr. 2.16 Princip průtlačného lisování



Metoda Conform

Metoda CONFORM (Continuous Extrusion Forming), patentována 1971, je poměrně novou metodou, kterou lze zařadit do skupiny tváření materiálu za studena. Na základě problému s opotřebením nebyla v minulosti příliš využívána. V současnosti se na metodu opět navázalo a jejím opakovaným použitím se zkouší dosáhnout velmi vysokého stupně deformace materiálu. Síla na protlačování materiálu přes matrici je vyvolána účinkem třecích sil mezi materiálem, drážkou obvodu otočného kola a odklopnou čelistí. Ta postupně po obvodu uzavírá zmiňovanou drážku otočného kola. Tato obvodová drážka je ukončena pevnou zarážkou, ve které je umístěna matrice. Podle obrázku 2.17, který popisuje princip metody Conform lze říci, že materiál, ve formě tabulového pásu, je veden tzv. podávacím válcem s podporou přitlačné kladky a je tlačén segmentem do vložky tvářecího nástroje. Tvářecí nástroj je umístěn v upevněném pouzdře. Vysoký stupeň deformace materiálu přináší požadované zjemnění zrna ve vložce nástroje.

Výchozími materiály u metody Conform jsou např. granule, tyče, drcený odpad nebo prášek. Tato metoda se využívá především pro hliníkové a měděné materiály k výrobě kruhových tyčí, drátů, trubek, dutých profilů, také pro elektrické vodiče, excentrické díly anebo ložiskové svorníky.



Obr. 2.17 Princip procesu Conform [21]

Základní vlastností kovových materiálů je tvařitelnost, která je definována jako schopnost kovových materiálů působením vnějších sil při určité teplotě měnit tvar bez porušení a změny objemu [11].



2.8.2 Válcování hliníku a jeho slitin

Jedná se o tváření kovů, v našem případě hliníku pomocí rotujících válců, mezi něž je materiál vtahován a zároveň dochází k jeho stlačování a prodlužování. Je možno válcovat za studena a za tepla. Válce jsou hladké nebo profilové podle konkrétních požadavků na konečný výrobek, na obr. 2.18 jsou uvedeny druhy válcování.

Válcovací trať se skládá z válců, které jsou uloženy ve stojanech a společně s dalším příslušenstvím tvoří válcovací stolicí. Tyto válcovací stolice jsou uspořádány vedle sebe nebo za sebou. Podle počtu válců a způsobu práce dělíme válcovací stolice na:

- dvouválcové (dua)
- tříválcové (tria)
- čtyřválcové (kvatro)
- univerzální aj.

Kromě zmíněných základních typů, mohou být válcovací tratě uzpůsobeny pro speciální požadavky, k různým účelům.

Výsledný tvar se obvykle nedosáhne v jednom válcovacím kroku. U válcování za studena je na konečnou tloušťku materiál redukován několika úběry. Podle slitiny, stupně deformace a tloušťce vstupujícího pásu to bývá kolem 20 - 50 %. Žádaný průřez konečného vývalku se dosahuje postupným přibližováním válců nebo změnou kalibru válců (mění se díry mezi tvarovými povrchy válců).

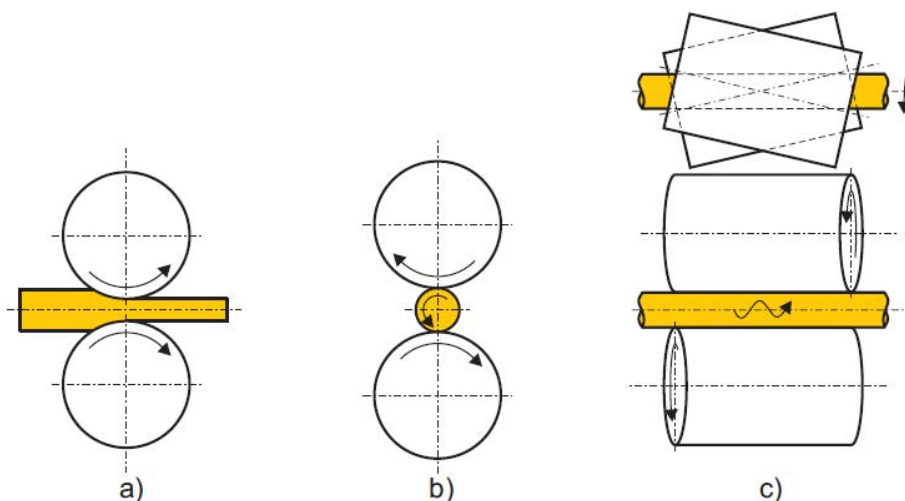
U válcování za tepla jsou bloky materiálu ohřáty na 400 až 500 °C záleží podle typu slitiny. Ohřátím na tyto teploty, které jsou nad teplotu rekrytalizace je tvářený materiál mnohem lépe plastičtější, tím pádem dochází jen k minimálnímu deformačnímu zpevnění. Následuje reverzní způsob válcování, u kterého postupným úběrem tloušťky pomocí válcovacích hlav vyválcujeme na konečnou tloušťku nebo na mezitloušťku jako plochý vývalek. Navinutý vývalek slouží po zchladnutí jako výstupní polotovar pro válcování za studena [14].

Obecně nejprve válcováním vzniká tzv. předvalek, což je polotovar vyrobený na předválcovacích stolicích a poté se na doválcovacích zařízeních vyrobí vývalek, což je konečný výrobek v podobě plechu, profilu nebo tyče.

Využití válcovaných hliníkových polotovarů je při konstrukci automobilu nepostradatelné. Válcované plechy, ať už hliníkové nebo z jiného materiálu mají



různorodé použití.



Obr. 2.18 Druhy válcování a) Podélné válcování, b) Příčné válcování, c) kosé válcování

2.8.3 Ohýbání hliníku a jeho slitin

Jedná se o způsob tváření materiálů, při němž se vytváří ostré nebo oblé hrany. Je to proces pružně plastické deformace, která má různý průběh od povrchu materiálu k neutrální ose. Při ohybu jsou napětí v krajních vláknech materiálu opačného smyslu (tah, tlak). Kolem střední části průřezu ohýbaného materiálu jsou tahová napětí malá, v přechodu mezi tímto pásmem jsou vlákna bez napětí a bez deformace. Jejich spojnice tvoří tzv. neutrální osu, v níž není napětí a která se při ohýbání ani neprodlouží, ani nezkrátí [3]. Na obr. 2.19 je ukázán princip této metody.

Při ohybu materiálu dochází ke zpětnému odpružení ohýbaných součástí, které je způsobeno pružnou deformací daného materiálu. Úhel odpružení je závislý na tvárnosti materiálu, na poloměru ohybu a způsobu jakým se ohýbá. Velikost odpružení lze zjistit pomocí tabulek sestavených na základě praktických zkoušek nebo pomocí empirických vzorců. Tabulky pro určení odpružení slouží pro orientační určení velikosti odpružení v praxi, které jsou zpracovány pro ocel, hliník, měď a jejich slitiny viz tab. 2.4.



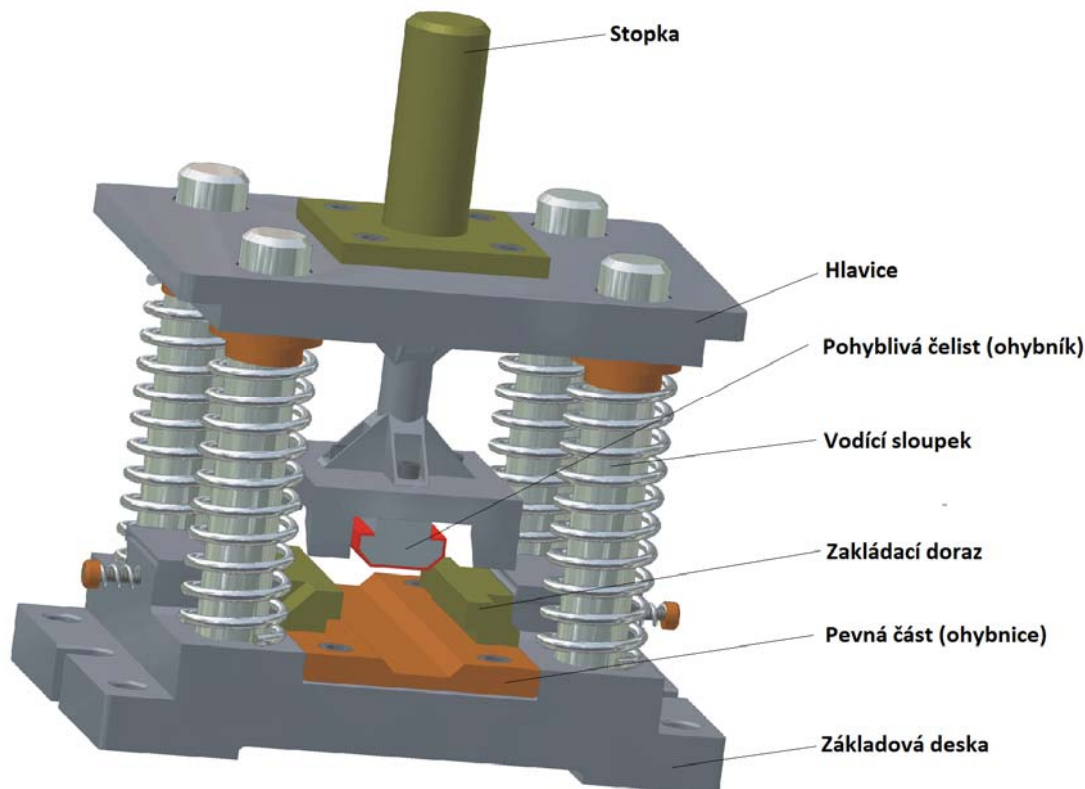
Tab. 2.4 Hodnoty úhlů odpružení dle druhu použitého materiálu

Materiál		R/t	
		0,8 až 2	>2
ocel δ_{Pt}	320 MPa	1°	3°
	320 až 400 MPa	3°	5°
	400 MPa	5°	7°
mosaz měkká		1°	3°
mosaz tvrdá		3°	5°
hliník		1°	3°

Výlisky ze slitiny Al-Mg-Si a Al-Zn-Mg je nutno provádět před ohýbáním, žíhání na měkko s následným tepelným zpracováním, nebo další možností je provést ohýbání po krátkodobém ohřevu do 200 °C. Zvýšená teplota při ohýbání umožňuje dosáhnout větších deformací, než je tomu u ohybů za studena. Vysoké teploty usnadňují dosáhnout menších poloměrů a ostřejších ohybů. Otevřené profily lze rovněž ohýbat přes ohřáté šablony a matrice. Tenkostěnné duté profily a trubky lze před ohybem naplnit vysušeným křemenným pískem. [14]

Nástroj, který se používá pro ohýbání, se nazývá ohýbadlo, jehož hlavními částmi jsou ohybník (pohyblivá část) a ohybnice (nepohyblivá část). Ohýbadlem lze vytvořit ohyb ve tvaru V, U atd. Konečný výrobek se nazývá výlisek.

Ohýbání se využívá u mnohých komponentů v konstrukci automobilu, ať už se hovoří o rámu, karoserii, ale i dalších ohýbaných materiálech.



Obr. 2.19 Princip ohýbání hliníkového materiálu [3]

2.8.4 Tažení drátů, tyčí a trubek z hliníku a jeho slitin za studena

Polotovary vyrobené průtlačným lisováním - tyče, trubky, profily, dráty, ale rovněž válcované trubky a dráty, se obvykle dále zpracovávají na konečné rozměry tažením. Tažení je v podstatě protahování polotovaru otvorem průvlastku, jehož průřez je menší než původní průřez polotovaru, protože objem polotovaru před tažením a po něm je zachován. Dochází k prodloužení taženého polotovaru. Tažením se zmenšuje příčný průřez a zvětšuje se délka polotovaru. Při výrobě polotovarů s malými průřezy se operace tažení opakuje několikrát a podle potřeby se zařazuje i mezižhánání linky. Rychlosti tažení se pohybují od 40 do 150 m/min., průměr tažených tyčí a trubek se pohybuje od 2 až po 55 mm, tažné síly od 16 do 400 kN. Tažením se dodává polotovarům správný tvar a přesné rozměry, zlepšuje se jejich kvalita povrchu a mechanické vlastnosti [11] [14]. Na obr. 2.20 je uveden princip tažení trubky.



Při tažení působí v pásmu deformace tyto síly:

- tahová síla ve směru podélné osy,
- tlaková síla, vznikající reakcí mezi taženým materiálem a stěnou průvlaku,
- třecí síla na stykové ploše průvlaku a taženého materiálu,

Tahové a tlakové síly vykonávají užitečnou deformační práci, tj. mění rozměry taženého materiálu, třecí síly působí proti směru tažení, zvyšují potřebu energie a způsobují ohřívání průvlaku a taženého materiálu [12].

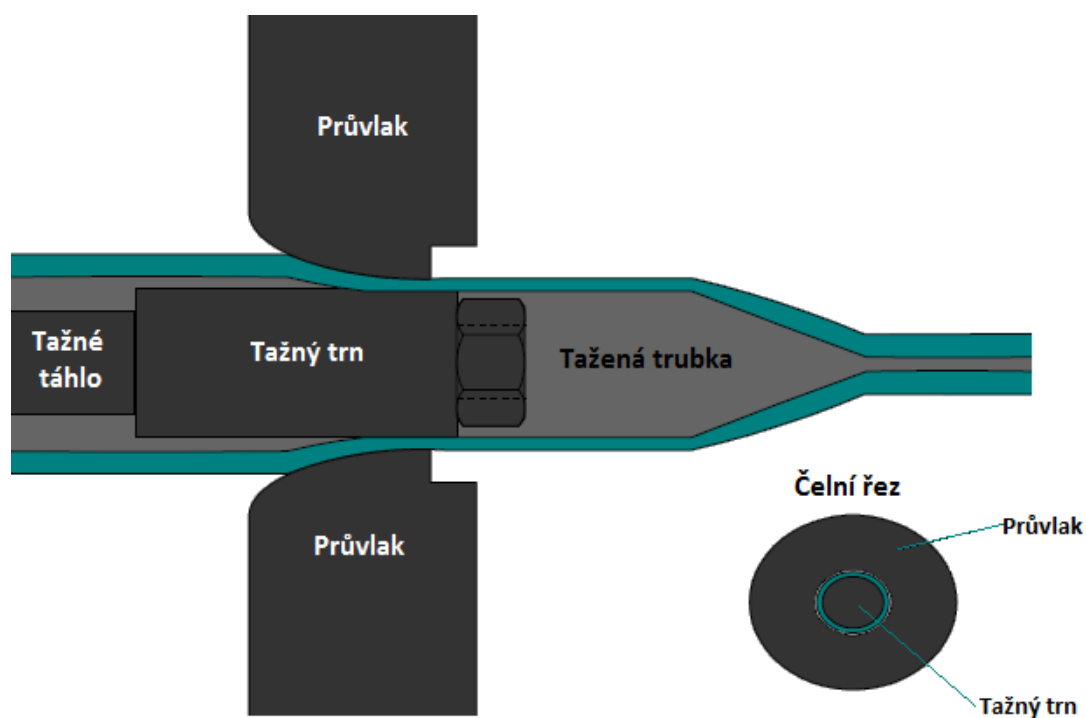
Při tažení slitin hliníku se nejčastěji používají vyválnované plechy, trubky nebo tyče. Nevyžíhaný materiál lze použít jen tehdy, není-li stupeň tváření při tažení příliš velký. Podle stupně tváření za studena se při válcování zvyšuje výsledná tvrdost a pevnost materiálu. Současně narůstá i mez kluzu, a to až do hodnot pevnosti v tahu. Za těchto podmínek není už materiál schopen dalšího tváření.

V různých částech tvářeného výtažku není stejný stupeň tváření. V tabulce 2.5 jsou zobrazeny změny mechanických vlastností dvou různých slitin hliníku při tváření tažením za studena. U slitiny s indexem A, pozorovat mez kluzu R_e , která stoupá rychleji než pevnost v tahu R_m . Síla, která působí na tvářené slitiny je vždy stejná, musí však být větší než síla na mezi kluzu. Tím dosáhneme trvalé deformace. Současně ale síla nemůže přesáhnout mez pevnosti z důvodů, aby se neporušila soudržnost tvářených slitin. [16]



Tab. 2.5 Mechanické vlastnosti hliníkových slitin[15]

Slitina	Číslo tahu	Tloušťka t [mm]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Zvýšení pevnosti [%]	Mez kluzu R_e [MPa]	Tažnost A [%]
A	0	2,60	112	-	42,7	30
	1	1,54	133	17,2	117	11
	2	2,46	155	38,4	147	9
	3	2,47	166	48,2	154	8
	4	2,49	169	51,1	157	7,5
B	0	2,60	205	-	100	27
	1	2,56	242	18,0	222	6
	2	2,58	278	36,2	261	5,5
	3	2,21	301	46,5	269	5
	4	2,26	308	50,2	275	5



Obr. 2.20 Princip tažení trubky

2.8.5 Kování hliníku a jeho slitin

Hliník a jeho slitiny mají obecně dobrou kujnost. Kovat lze volně nebo v zápustkách, ručně i strojně. Kováním se materiálu dává požadovaný tvar údery kladiva, beranů bucharů, popř. se dá lisovat klidným tlakem. Vstupní materiál slitiny hliníku má teplotu při kování většinou 50 °C pod solidem. Doporučené rozmezí kovacích teplot je úzké.



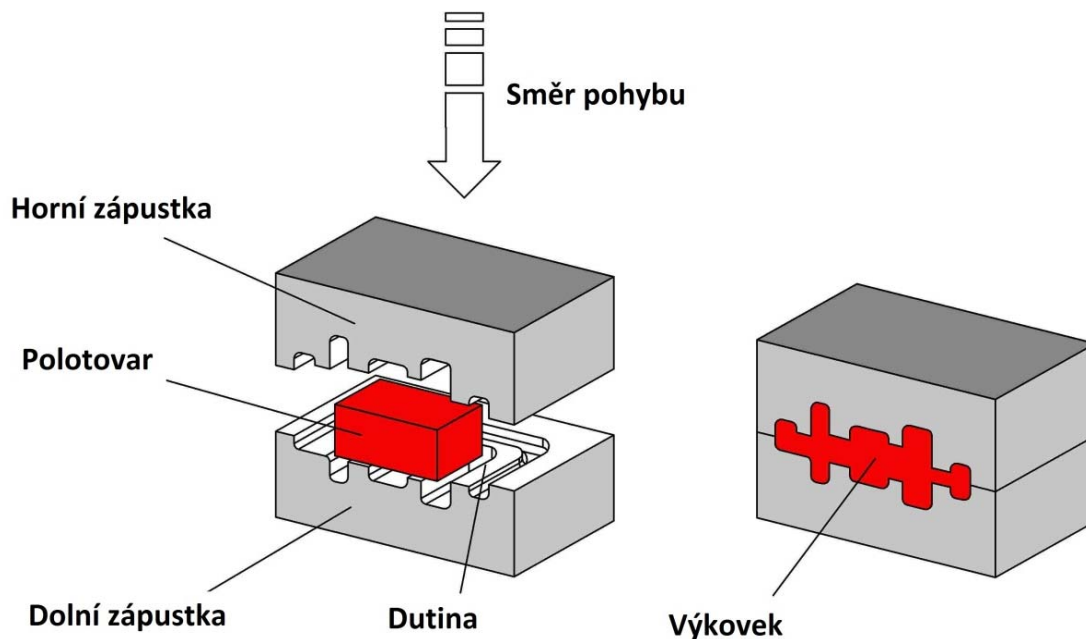
Volné kování se provádí opakovaně jednoduchým tvářecím nástrojem – kovádlem, přičemž se dotýká jen části tvářeného materiálu. Tato metoda je z ekonomického hlediska výhodnější než zápustkové kování, protože v případech výroby menších sérií velkých součástí, kde se nevyplatí výroba drahé zápustky, nebo v případech výroby několika málo kusů za účelem vytváření nových prací. Nejčastější operace volného kování je pěchování, prodlužování, prorážení a ohýbání. Metoda se používá většinou pro výrobu jednoduchých tvarů (kruhového, čtvercového nebo mnohoúhelníkového průřezu).

Zápustkové kování se tváří v předeřátých zápustkách, kde se při kování dosahuje lepších mechanických vlastností a jemné, stejnoměrné struktury. Při zápustkovém kování je vstupní materiál u hliníkových slitin nejčastěji lisovaná tyč nebo litý čep vtlačen pomocí úderů nástroje nebo tlakem do zápustky (kovová forma, která nemusí být tak pevná jako u tváření ocelí). Nástroj lisu je vyhříván, aby bylo možné udržet tok materiálu (rychlost deformace) v optimálních mezích. Zápustkové výkovky ze slitin hliníků jsou lépe tvarově přizpůsobeny budoucímu účelu, než je tomu např. u ocelových výkovků. Metoda přesného zápustkového kování umožňuje výrobu přesných výkovků. Přesné výkovky jsou charakterizovány tím, že nepotřebují mino vrtání otvorů žádné další obrábění. Princip zápustkového kování je uveden na obr. 2.21.

Strojní kování ulehčuje těžkou a namáhavou práci dělníka, zrychluje a zproduktivňuje výrobu malých a středních výkovků, umožňuje výrobu těžkých výkovků, na které lidská síla nestačí. Materiál se kove na různých tvářecích strojích, z nichž nejdůležitější jsou buchary a mechanické lisy (klikové, vřetenové).

Buchary pracují rychlostí 5 až 7 m/s, působí na tvářený materiál údery (rázy), ale prokovou jej jen do určité hloubky. Hospodárně lze kovat středně velké výkovky, popř. předkovky. Předkovky se dále kovou v zápustkách na požadovaný tvar výkovku. Při úderech beranu bucharu odpadávají z tvářeného materiálu okuje, a proto je povrch výkovku čistý [3].

Lisy pracují rychlostí 0,4 až 0,6 m/s se používají k tváření materiálu klidným tlakem. Jsou schopny prokovat materiál v celém jeho průřezu. Na lisech se zhotovují i nejtěžší výkovky a v případech zápustkových výkovků složitého tvaru. Pro přesné výkovky se nejčastěji používají slitiny řady 7xxx, a to slitiny 7075, 7175, 7475, méně slitiny řady 2xxx a 6xxx. Práce je bezpečnější než na bucharech [14].



Obr. 2.21 Princip zápustkového kování

2.8.6 Stříhání hliníku a jeho slitin

Pro tvorbu rozmanitých tvarů se využívá stříhání hliníkových plechů a pásů. Při tomto způsobu tváření se materiál postupně nebo současně odděluje v celém svém průřezu. Přesnost a kvalita střížné plochy je ovlivněna několika faktory - velikostí střížné mezery a vůle, vlastnostmi stříhaného materiálu, způsobem stříhání, kvalitou střížného nástroje apod.

Hodnota střížné mezery je závislá především na zvoleném druhu materiálu a jeho tloušťce. Nejčastěji se stanovuje v procentech tloušťky stříhaného materiálu. Pro uzavřené stříhy v nástrojích (dle ČSN 226015) je hodnota střížné mezery, pro tloušťku materiálu u měkkých ocelí, mosazi a hliníku.

Vycházíme ze vzorce: $z = (2,5 \div 7,5) \% \cdot t$

Střížná vůle ovlivňuje nejvíce jakost střížné plochy, ale i velikost střížné síly. Parametr vůle je nejdůležitější pro dosažení správných výsledků. Nastavení nesprávného parametru střížné vůle může způsobit špatné ostřížené plochy. Dalším tváření např. ohýbáním nebo svařováním může plech prasknout.

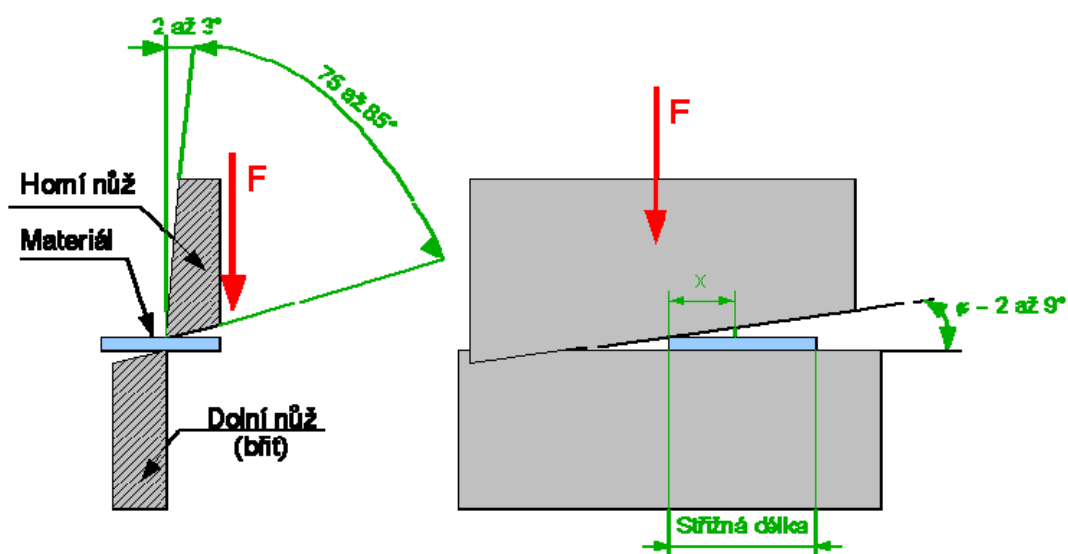
Při stříhání je nutno taky počítat s nástřihovým plánem, který zajistí co nejmenší odpad. Volba nástřihového plánu závisí na minimálních vzdálenostech mezi výrobky a od okraje pásu, tvaru a konstrukci výrobku a na dodržování zásad konstrukce.



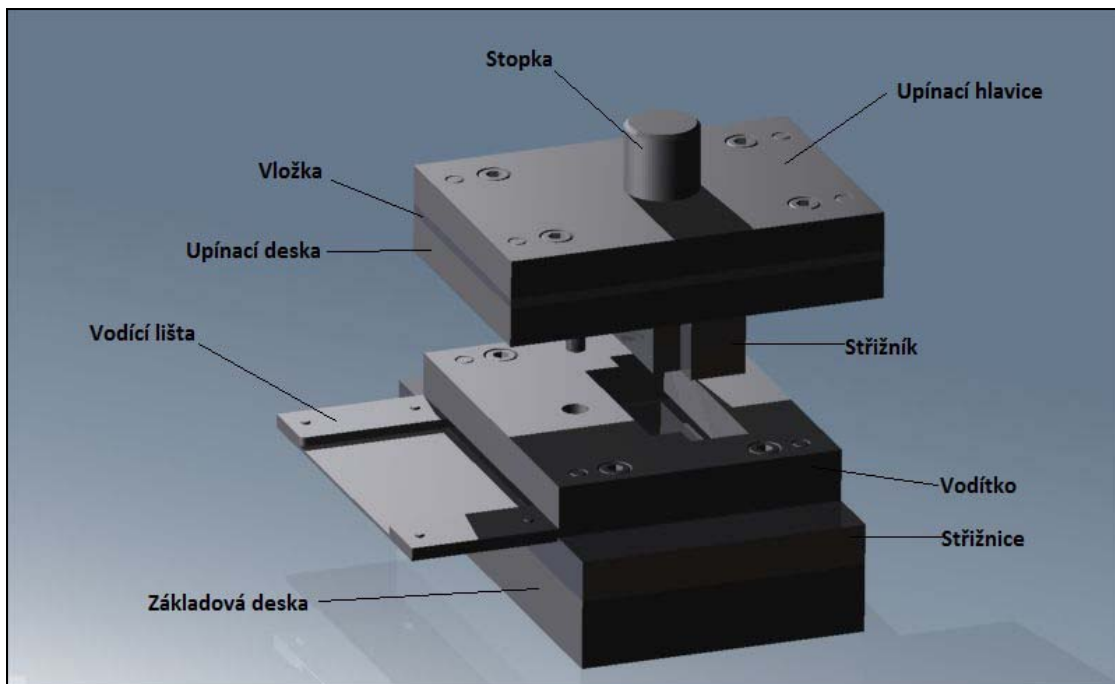
Stříhání se využívá při tvarování plechů na plášť automobilu, při zkracování délek a vystřihování požadovaných tvarů. Druhy nástřihových plánů jsou kusový nebo skupinový. Stříhání zahrnuje různé způsoby práce jako přestřihování, vystřihování, děrování, ostřihávání, nastřihávání, protrhávání materiálu apod.

Ke stříhání slouží nůžky (např. tabulové) nebo stříhací nástroje (stříhadla). Princip stříhání je uveden na obr. 2.23. Hlavními částmi stříhadla jsou střížník a střížnice. Hliníkový materiál vložený mezi tyto dvě části je veden vodíci lištami a při jednotlivých posuvech je oddělován. Existuje několik druhů stříhadel:

- jednoduché stříhadlo – určeno pro jednoduché tvary z plechů
- postupové stříhadlo obr. 2.23 – výstřižek se zhotovuje postupně, při prvním kroku je provedeno děrování, v dalším kroku se vystřihuje
- sloučené stříhadlo – v jednom kroku lze vystřihovat a současně děrovat
- druzené stříhadlo – ve dvou krocích lze např. děrovat, stříhat, ohýbat apod.



Obr. 2.22 Princip stříhání na jednoduchém stříhadle



Obr. 2.23 Postupové stříhadlo.

2.8.7 Další druhy tváření hliníku a jeho slitin

Dalším druhem tváření je tzv. zakružování používané při výrobě válcových nebo kuželových výrobků. Dále se používá lemování, kdy se vytvářejí podélné žlábký uprostřed nebo na okrajích plechu. Vytvořením těchto žlábků se zvyšuje tuhost plechových výlisků. Hliníkový materiál lze také nýtovat. Např. speciální nýtování se využívá v automobilovém průmyslu na rám auta a karosářské panely



3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bylo vyhodnotit vliv teploty zatěžování na základní mechanické vlastnosti Al slitiny. Zvolená hliníková slitina se používá k výrobě chladících zařízení do automobilů. Z tohoto důvodu, je nutné znát její chování v různých teplotních podmínkách. Pro experiment byla zvolena statická zkouška tahem.

3.1 Použitý materiál

Zkoušeným materiálem, který byl podroben zkoušce tahem, byla hliníková slitina s obchodním názvem FA 6815, která byla plošně vyválcovaná, a je určena pro automobilový průmysl na výměníky tepla. Experimentální slitina patří do skupiny FA 68XX, která je k dispozici ve čtyřech různých úrovních obsahu zinku tab. 3.1. Slitina se vyznačuje dobrými ohybovými vlastnostmi, je navržena tak, aby byla vhodná pro pájení natvrdo. Vysoký obsah manganu a křemíků může přispět k vyšší pevnosti po pájení. Odolnost proti korozi je velmi dobrá. Chemické složení této hliníkové slitiny k tváření je v tab. 3.2 a mechanické vlastnosti dané slitiny v tab. 3.3. Rozměry vzorků: $L_0 = 80 \text{ mm}$, $b = 20 \text{ mm}$, $t = 0,07 \text{ mm}$.

Tab. 3.1 Chemické složení v hm. % slitin hliník s obchodním názvem FA 68xx s různým obsahem hliníku

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Zr
FA 6800	0,65–1,0	< 0,4	0,05	1,4–1,8	< 0,05	0,10	0,05–0,20
FA 6807	0,65–1,0	< 0,4	0,05	1,4–1,8	< 0,05	0,5–0,9	0,05–0,20
FA 6815	0,65–1,0	< 0,4	0,05	1,4–1,8	< 0,05	1,3–1,7	0,05–0,20
FA 6825	0,65–1,0	< 0,4	0,05	1,4–1,8	< 0,05	2,3–2,7	0,05–0,20

Tab. 3.2 Chemické složení v hm. % slitiny hliník s obchodním názvem FA 6815

Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Zr	Al
min.	0,50	-	-	1,40	1,20	0,05	Zbytek
max.	1,00	0,70	0,10	1,80	1,80	0,20	



Tab. 3.3 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku s obchodním názvem FA 6815 za pokojové teploty

	Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	A_{50mm} [%]
max.	194	188	0,70
min.	187	183	0,60

3.2 Experimentální metoda

Pro experiment byly zvoleny statické zkoušky tahem dle norem EN ISO 6892 -1, EN ISO 6892 -2 a ČSN 420313. Tato zkouška patří k nepoužívanějším v technické praxi.

Pevnost můžeme charakterizovat jako schopnost látek zachovávat celistvost pod působením vnějších sil. V technické praxi jsme zvyklí vyjadřovat pevnost jako nejvyšší napětí, vztažené při zkoušce tahem na původní průřez zkušební tyče vyjádřené v MPa. Při zkoušce tahem zjišťujeme kromě pevnosti i další meze, a to mez úměrnosti, mez kluzu (mez 0,2), popřípadě jiné smluvní meze, určené velikostí trvalé deformace. Dále zjišťujeme tažnost a kontrakci [7].

Statickou zkoušku tahem lze považovat za jednu ze základních mechanických zkoušek. Tato zkouška spadá do zkoušek statických. Statické mechanické zkoušky vyjadřují chování materiálu za působení klidných, plynule a spojitě se měnících sil, bez rázů. U zkoušky tahem se zpravidla provádí zatěžování zkušebního tělesa pouze jednou, až do jeho porušení.

3.3 Příprava vzorků

K získání co nejpřesnějších výsledků je nutné dodržovat správný postup a zásady měření vztahující se k provádění zkoušky. Následně lze provést daný experiment a potřebné výpočty s vyhodnocením získaných výsledků. Bylo nutné zvolený materiál vhodně připravit, aby mohla být provedena tahová zkouška, jejíž výsledky budou důvěryhodné.

Běžně vyrobené materiály nejsou homogenní a izotropní. Výsledky zkoušek závisí i na místě a způsobu odběru vzorku. Vzorky je nutno odebírat tak, aby charakterizovaly vlastnosti materiálu – buď průměrné vlastnosti, nebo vlastnosti měřené oblasti výrobku, která je nejvíce exponována z hlediska technologického



chování nebo je rozhodující z hlediska provozního namáhání a životnosti výrobku. Dle těchto záměrů se volí místo, metoda odběru a počet vzorků [13].

Vzorky byly odebrány z pásu folie pod úhlem 0° . Z daných vzorků hliníkové slitiny byly vystřiženy v tvarovém stříhadle zkušební tyčky. Na obr. 3.1 je uvedena fotografie jednoho ze vzorků použitých k tahové zkoušce. Geometrie vzorku byla upravena tak, aby odpovídala předepsaným požadavkům, neboť tvary a rozměry vzorků pro tahovou zkoušku jsou normalizovány. Po připravení vzorku je možné přejít k samotnému experimentu.



Obr. 3.1 Zkoušený vzorek z hliníkové slitiny

3.4 Průběh zkoušky

Tahová zkouška byla provedena dle platné normy EN ISO 6892 -2. Jako pracovní stroj pro tahovou zkoušku byl použit Tiratest 2300, který je uveden na obr. 3.5. Jelikož cílem práce bylo zkoumat chování zvolené hliníkové slitiny při různých teplotách zatěžování, bylo nutné použít teplotní komoru. Pomocí této komory lze regulovat teploty v širokém intervalu teplot, jak plusových, tak minusových. Jako chladicí médium se používá tekutý dusík. Rychlost zatěžování byla zvolena na 10 mm/min se zatížením trhací hlavy 10 KN. Zkouška tahem byla provedena pro teploty -40, -20, 0, 20, 40, 60 a 80 °C. Pro každou teplotu byly použity 4 zkušební tyčinky.

Vzorek byl vkládán do chladicí komory, kde jsou uloženy trhací čelisti, které jsou ovladatelné pomocí pneumatického pedálu, což umožňuje rozevření a otevření čelistí. Pevně upevněný vzorek byl vystaven na určitou dobu požadované teplotě, aby došlo k temperaci materiálu. Následně mohla začít zkouška.

Předmětem zkoumání se stalo chladicí zařízení do automobilu, které je v provozních podmínkách vystavováno různým klimatickým vlivům a pracuje v různých teplotních podmínkách. Na obr. 3.6 je fotografie části chladicího zařízení ze slitiny hliníku, která byla předmětem pro tahovou zkoušku.



Obr. 3.5 Pracovní stroj Tiratest 2300 použitý pro tahovou zkoušku



Obr. 3.6 Část chladícho zařízení ze slitiny hliníku použité pro zkoušku tahem

3.5 Vyhodnocení

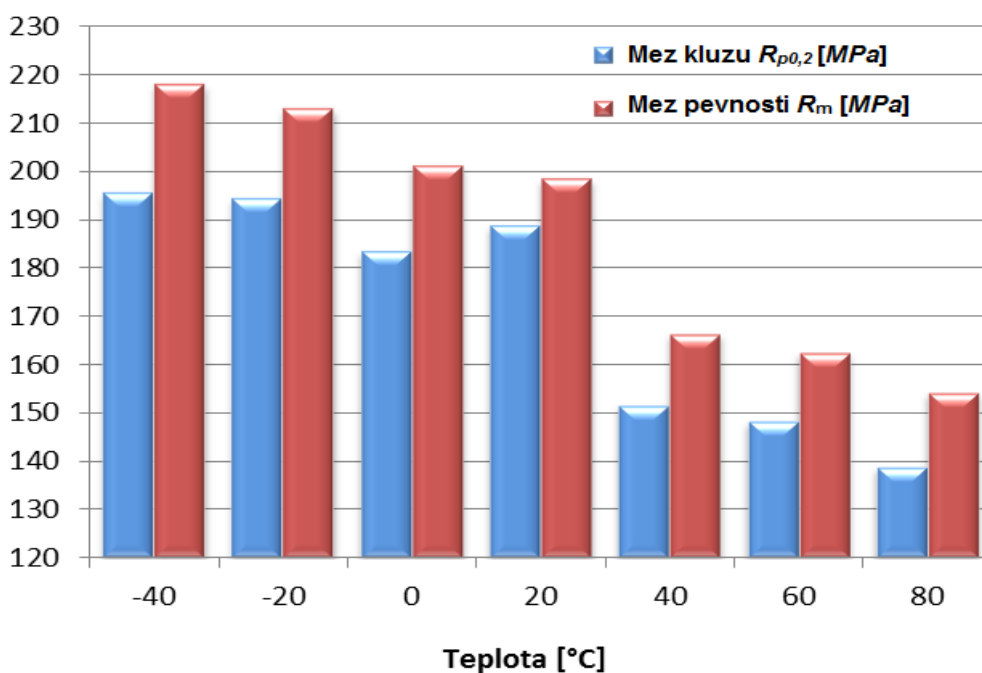
Z veškerých zkoušek tahem pro teploty -40 , -20 , 0 , 20 , 40 , 60 a 80 °C se vyhodnotila mez kluzu $R_{p0,2}$ a mez pevnosti R_m . Jelikož se v chladicí komoře nemohl použít průtahoměr, nebylo možné vyhodnotit tažnost. Pro vyhodnocení zkoušky tahem byl použit počítačový program s názvem Labnet 4. V přílohách č. 3 až 9 této bakalářské práce jsou uvedeny veškeré protokoly z tahových zkoušek pro zvolené teploty.



V tab. 3.5 jsou uvedeny průměrné hodnoty zjištěných mezí kluzu a pevnosti s příslušnými směrodatnými odchylkami. S touto tabulkou také souvisí graf obr. 3.7, který zobrazuje závislost průměrných mezí kluzu a mezí pevnosti na teplotách zkoušky. Z grafu jasně vyplývá, že mez kluzu $R_{p0,2}$ a mez pevnosti R_m je závislá na teplotě. S rostoucí teplotou mají obě meze klesající charakter.

Tab. 3.5 Statistické hodnoty získaných údajů

Teplota T [°C]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Směrodatná odchylka pro $R_{p0,2}$	Mez pevnosti R_m [MPa]	Směrodatná odchylka pro R_m
-40	195,6	5,6	218,1	0,9
-20	194,5	5,3	213,2	2,0
0	183,5	14,2	201,2	12,6
20	188,9	0,8	198,6	0,9
40	151,7	1,4	166,5	1,0
60	148,3	2,3	162,6	1,4
80	138,9	3,1	154,3	3,2

Obr. 3.7 Závislost průměrné meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m na teplotě



Pro lepší přiblížení změn průměrných hodnot meze kluzu a meze pevnosti při zkoušce tahem byly sestrojeny grafy vyjadřující procentuální změny této charakteristiky. Tyto grafy jsou uvedeny na obr. 3.8 a obr. 3.9.

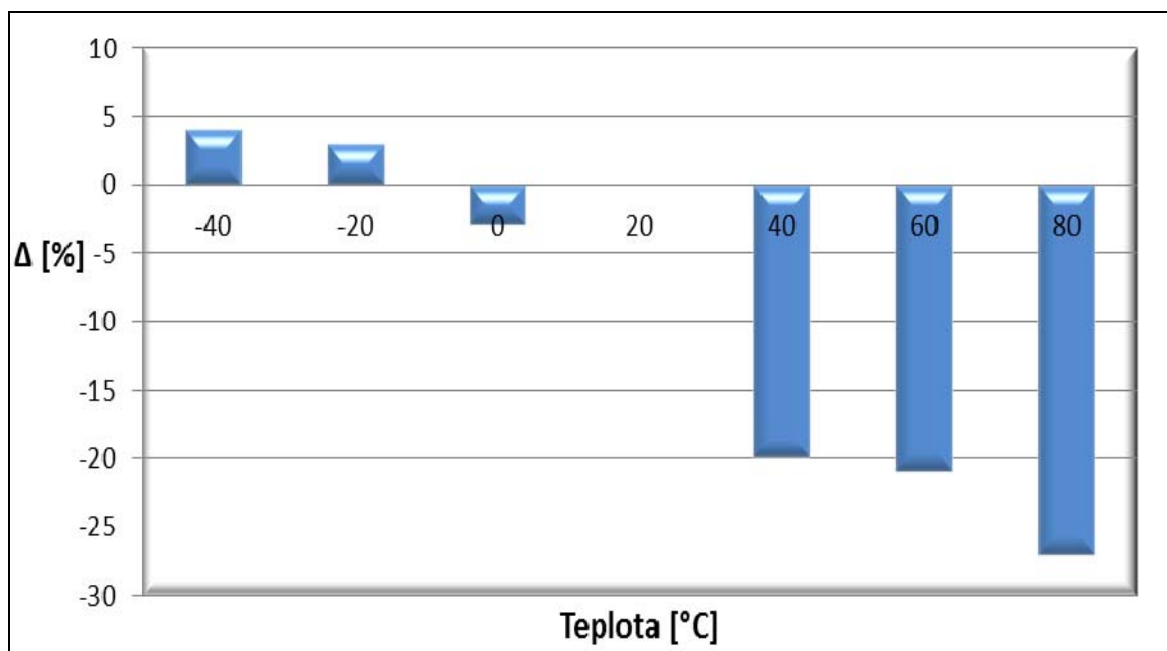
Jako výchozí teplota pro srovnávání byla zvolena teplota 20 °C, která představuje 100%. Zbylé hodnoty meze kluzu pro zvolené teploty jsou procentuálním srovnáním s touto výchozí hodnotou. Z grafu na obr. 2.8 je patrné, že hodnoty meze kluzu klesly až o 27 % se stoupající teplotou zkoušky. Naproti tomu, při nízkých teplotách se mez kluzu pohybuje přibližně okolo 100 % nebo mírně nad touto hodnotou. Přesné procentuální rozdíly jsou vidět v tab. 3.6.

Lze tedy konstatovat, že mez kluzu je závislá na teplotě, což právě v oblasti využití hliníkových materiálů pro automobilový průmysl, hraje značnou roli, neboť čím je mez kluzu $R_{p0,2}$ a mez pevnosti R_m nižší, tím dříve dojde k porušení materiálu. Stejně tak lze konstatovat, že pokud se zvýší poměr meze kluzu a meze pevnosti $R_{p0,2}/R_m$, dojde ke snížení plasticity materiálu. Velikost meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m nám tedy do značné míry ovlivňuje životnost zařízení, neboť pokud jsou tyto hodnoty zvýšené, pak jsou příznivě ovlivněny pevnostní vlastnosti vyrobeného dílu i jeho tuhost.

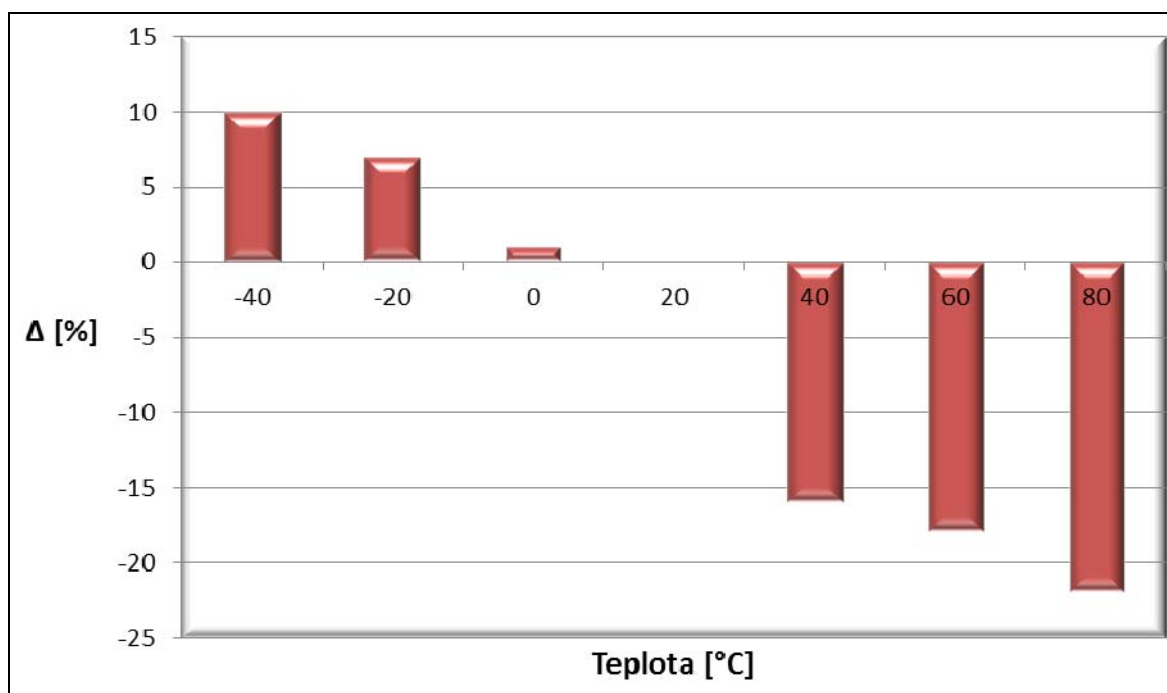
Z tahových diagramů na obr. 3.10 je evidentní, že ze zjištěných závislostí, má teplota nezanedbatelný vliv na charakter průběhu závislosti síly na prosté deformaci. Při zvyšující se teplotě zkušebního vzorku evidentně klesá zjištěná maximální síla F .

Tab. 3.6 Procentuální změny meze kluzu a pevnosti pro dané teploty

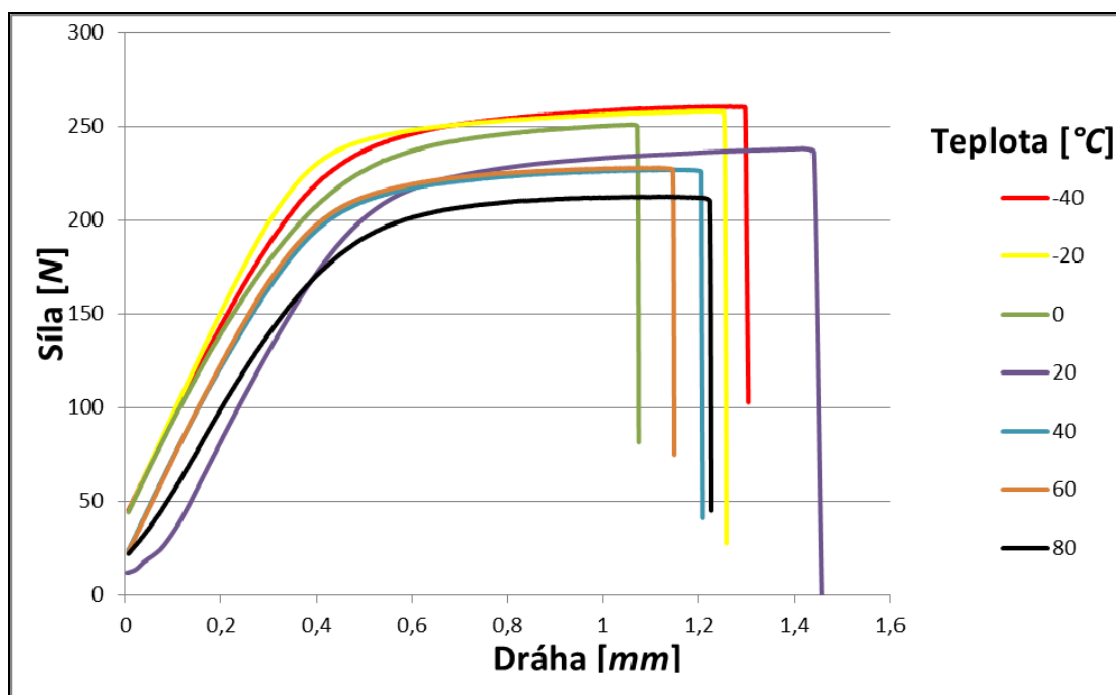
Teplota T [°C]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	$\Delta\%$ k 20 °C	Mez pevnosti R_m [MPa]	$\Delta\%$ k 20 °C
-40	195,6	4	218,1	10
-20	194,5	3	213,2	7
0	183,5	-3	201,2	1
20	188,9	0	198,6	0
40	151,7	-20	166,5	-16
60	148,3	-21	162,6	-18
80	138,9	-27	154,3	-22



Obr. 3.8 Procentuální vyjádření změny meze kluzu pro zvolené teploty



Obr. 3.9 Procentuální vyjádření změny meze pevnosti pro zvolené teploty



Obr. 3.10 Srovnání tahových diagramů za teplot -40, -20, 0, 20, 40, 60, 80 °C



4 ZÁVĚR

Bakalářská práce s názvem „Vliv teploty provozního prostředí na mechanické vlastnosti Al slitin“ se snaží přiblížit využití hliníku a hliníkových slitin nejen v automobilovém průmyslu, ale podává základní přehled o těchto materiálech, jejich rozdělení, způsobu zpracování a technologických postupech, včetně hodnocení vlivu teploty při tahové zkoušce na zvolenou hliníkovou slitinu, která je dostatečně reprezentativním vzorkem materiálu, využívajícího se při konstrukci automobilu.

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. V teoretické části jsou uvedeny základní vlastnosti hliníku i hliníkových slitin a jejich využití v automobilovém průmyslu. Jsou zmíněny výhody i nevýhody použití těchto materiálů. Blíže je specifikováno jednotlivé rozdělení slitin hliníku na slévárenské a slitiny pro tváření. Byly zpracovány základní informace zahrnující vybrané slitiny, včetně tepelného zpracování a chemického složení.

Další z kapitol tvoří teoretické části práce, které se zabývají tvářením hliníku a jeho slitin, neboť tvářecí procesy jsou nepostradatelnou součástí zpracování materiálů v automobilovém průmyslu. V jednotlivých kapitolách je zmíněn princip průtláčného lisování, válcování, ohýbání, kování, stříhání, tažení a dalších tvářecích metod využívaných v automobilovém průmyslu.

Koroze je jedním z degračních procesů materiálu, který postihuje také hliník a jeho slitiny, proto je nutné se otázkou koroze u těchto materiálů zabývat. Z tohoto důvodu je v práci uvedena kapitola shrnující nejdůležitější informace o korozi.

Vzhledem k tomu, že hliník a hliníkové slitiny jsou používány v celé řadě průmyslových odvětví, jsou díky různorodým provozním podmínkám vystavovány celé řadě negativních vlivů ovlivňujících jejich mechanické vlastnosti a především jejich životnost. Důležitou roli hraje teplota pracovního prostředí, a proto je součástí teoretické části také kapitola zahrnující vliv teploty na zmiňované materiály. Jsou zde uvedeny základní informace o creepu a lomové houževnatosti, které jsou závislé na teplotě, a také o dalších degračních procesech.



Experimentální část se zabývá tahovou zkouškou vybrané hliníkové slitiny při různých teplotách. Reprezentativní vzorek slitiny FA 6815, která se používá pro výrobu chladících zařízení do automobilů, byl podroben zkoušce tahem. Následně byly vyhodnoceny meze kluzu $R_{p0,2}$ a meze pevnosti R_m . Podle dosažených výsledků lze konstatovat, že hodnoty $R_{p0,2}$ a R_m s rostoucí teplotou klesají, což je v souladu s teoretickými předpoklady. Tyto výsledky potvrzují skutečnost, že výběr materiálu pro daný komponent, v našem případě se jedná o chladící zařízení do automobilu, hraje důležitou roli. Právě v provozních podmínkách je tato součást vystavena působení různých klimatických vlivů, změnám teploty apod. Je tedy důležité se otázkou chování tohoto materiálu při pracovním procesu zabývat.



5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAZANCOVÁ, Eva. Studijní opora, Název opory/předmětu: Materiály pro náročné technické aplikace, číslo předmětu: 636 – 0804, katedra: Materiálové inženýrství. VŠB-TUO.
- [2] MICHNA Š., KUŚMIERCZAK Technologie a zpracování hliníkových materiálů, FVTM UJEP 2008, Ústí nad Labem
- [3] HLUCHÝ M., BENEŠ J. Strojírenská technologie pro SPŠ nestrojnické, Praha: SNTL 1981, 1. vyd., 248 str.
- [4] PUCHNAR B. Hliník a hliníkové slitiny, Brno: Západoomoravské tiskárny, vydalo ministerstvo hutního průmyslu a rudných dolů.
- [5] ŠVEŘEPA O., SVOBODNÝ Z. Koroze hliníku a jeho slitin, Praha: Práce - vydavatelství a nakladatelství ROH, v knižnici Československé vědecké technické společnosti, Praha 1959.
- [6] STRNADEL B., Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství, Ostravské tiskárny, Ostrava 1998, 334 str.
- [7] SEDLÁČEK V., Neželezné kovy a slitiny, SNTL Praha 1979, 1. vyd., 398 str.
- [8] STRNADEL B., Nauka o materiálu II – Degradací procesy a design konstrukčních materiálů, VŠB- TU Ostrava 2008, ISBN 978-80-248-1842-9, 1. vyd., 280 str.
- [9] PLUHAŘ J., KORITA J., Strojírenské materiály, SNTL/ALFA Praha 1977, 2. vyd., 568 str.
- [10] BOHÁČEK F. A kolektiv, Základy strojnictví, SNTL Praha 1989, 1. vyd., 464 str., ISBN 80-03-00083-1
- [11] KLOFÁČ, J. Tváření neželezných kovů pro 4. ročník SPŠ hutnických, SNTL, Praha 1982, 1. vyd., 144 str.



- [12] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B. Tváření oceli, SNTL/ALFA, Praha 1988, 1. vyd., 520 str.
- [13] PLUHAŘ, J. Nauka o materiálu, SNTL, Praha 1989, 1. vyd., 552 str.
- [14] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H., MIŠKUFOVÁ, A. aj. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: ADIN, 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [15] TIŠNOVSKÝ, M. a MÁDLE, L. *Hluboké tažení plechu na lisech*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1990. 198 s. ISBN 80-03-00221-4.
- [16] DOUBEK, P., SOLFRONK, P., KOLNEROVÁ, M., KOVÁRNÍK, L. Vliv stárnutí na tvařitelnost hliníkových plechů - Nové směry vo výrobných technologiách 2004, 17. – 18. JÚN 2004, PREŠOV, SLOVENSKÁ REPUBLIKA
- [17] PELLOUX, M. M. 4th International conference on strength of metals and alloys. Nancy 1976
- [18] Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování, Ing. Jiří Koutný [online], [cit. 5. 3. 2011], Dostupné z internetu: <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>
- [19] Web Help Beta, 2011 Návoděda SolidWorks [online], [cit. 6. 3. 2011], Dostupné z internetu: http://help.solidworks.com/2011/czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Materials/Material_models/Creep_Models.htm
- [20] International Aluminium Institute [online], [cit. 22. 4. 2011], Dostupné z internetu: https://stats.world-aluminium.org/iai/stats_new/formServer.asp?form=1
- [21] Nové nekonvenční technologie, RUSZ, V., VŠB-TUO, [online], [cit. 4. 4. 2011], Dostupné z internetu: <http://www.novenekonvencnitechologie.cz/?id=2>
- [22] HIRSCH, J.. Automotive Trends in Aluminum, The European Perspective [online], [cit. 2009-05-25]. Dostupné z internetu: <http://www.keytometals.com/Article135.htm>.



BP – Vliv teploty prostředí na mechanické vlastnosti AL slitin

[23] *Audi Deutschland* [online], [.cit. 2009-05-26]. Dostupné z internetu:
<<http://www.audi.de>>.



6 Seznam příloh

- Příloha 1: Typické hodnoty mechanických vlastností určených zkouškou tahem při nízkých teplotách vybraných slitin hliníku
- Příloha 2: Typické hodnoty mechanických vlastností určených zkouškou tahem vybraných tvářených slitin hliníku po 10 000 hodinách výdrže na teplotě zkoušky
- Příloha 3: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série -40
- Příloha 4: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série -20
- Příloha 5: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série 0
- Příloha 6: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série +20
- Příloha 7: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série +40
- Příloha 8: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série +60
- Příloha 9: Protokoly ze statické zkoušky tahem z materiálu série +80

Příloha 1

Typické hodnoty mechanických vlastností určených zkouškou tahem při nízkých teplotách vybraných tvářených slitin hliníku [14]

Slitina	Teplota zkoušky /°C/											
	- 196			- 80			- 28			20		
	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/
Al99 W8	170	40	50	100	38	43	95	35	40	90	35	40
Al99 F12	210	140	45	140	125	24	130	115	20	125	115	20
Al99 F16	230	180	30	180	160	16	170	160	15	165	150	15
AlMnCu W10	230	60	46	140	50	42	120	45	41	110	40	40
AlMnCu F15	240	170	30	165	150	18	150	140	16	150	140	16
AlMnCu F19	280	230	23	220	200	11	205	190	10	200	185	10
AlMn1Mg1 W16	290	90	38	190	75	30	180	70	26	180	70	25
AlMn1Mg1 G22	360	230	26	260	210	16	250	200	13	240	200	12
AlMn1Mg1 G27	400	300	20	300	260	10	290	250	7	280	250	6
AlMg2.5 W17	300	110	46	200	90	35	195	90	32	195	90	30
AlMg2.5 G25	380	250	28	280	220	21	260	210	18	260	210	16
AlMg2.5G27	410	300	25	300	260	18	290	260	15	290	260	14
AlMg2.7Mn F22	370	130	39	260	120	30	250	120	27	250	120	25
AlMg2.7Mn G25	410	250	32	290	210	23	280	210	20	280	210	18
AlMg2.7Mn G27	430	180	30	320	250	21	300	240	18	300	240	16
AlMg4Mn W24	380	130	46	270	120	35	260	120	32	260	120	30
AlMg4.5Mn W28	400	160	36	300	140	30	290	140	27	290	140	25
AlCuMg2 F44	580	420	19	490	340	19	475	325	19	470	320	19
AlCuSiMn F46	580	500	14	510	450	13	500	430	13	480	410	13
AlZnMgCu1.5 F53	700	630	9	620	540	11	590	520	11	570	500	11

Příloha 2

Typické hodnoty mechanických vlastností určených zkouškou tahem vybraných tvářených slitin hliníku po 10 000 hodinách výdrže na teplotě zkoušky [14]

Slitina	Teplota zkoušky /°C/																	
	20			100			150			200			260			315		
	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/	R _m /MPa/	R _{p0.2} /MPa/	A /%/
Al99 W8	90	35	40	70	30	45	55	30	55	40	25	65	30	20	75	20	15	80
Al99 F12	125	115	20	110	105	20	95	85	23	70	50	26	30	20	75	20	15	80
Al99 F16	165	150	15	145	130	15	125	95	20	40	25	65	30	20	75	20	15	80
AlMnCu W10	110	40	40	90	40	43	75	35	47	60	30	60	40	25	65	30	15	70
AlMnCu F15	150	140	16	145	130	16	125	110	16	95	60	20	50	30	60	30	15	70
AlMnCu F19	200	185	10	180	145	10	160	110	11	95	60	18	50	30	60	30	15	70
AlMn1Mg1 W16	180	70	25	180	70	25	150	70	35	95	65	55	70	50	70	50	35	80
AlMn1Mg1 G22	240	200	12	235	200	13	195	170	22	145	105	35	95	50	55	50	35	80
AlMn1Mg1 G27	280	250	6	275	250	7	215	185	15	150	105	30	85	50	50	50	35	80
AlMg2.5 W17	195	90	30	195	90	35	160	90	50	115	75	60	85	50	80	50	40	110
AlMg2.5 G25	260	210	16	260	210	18	205	185	27	165	105	45	85	50	80	50	40	110
AlMg2.5G27	290	260	14	275	250	16	235	195	24	170	105	45	85	50	80	50	40	110
AlMg2.7Mn F22	250	120	25	250	115	21	200	110	50	150	105	60	115	75	80	75	50	110
AlMg2.7Mn G25	280	210	18	270	200	20	220	180	37	170	130	45	115	75	80	75	50	110
AlMg2.7Mn G27	300	240	16	295	235	18	235	195	32	180	130	45	115	75	80	75	50	110
AlMg4Mn W24	260	120	30	260	115	36	200	110	50	150	105	60	115	75	80	75	50	110
AlMg4.5Mn W28	280	140	25	275	135	36	215	130	50	150	115	60	115	75	80	75	50	110
AlCuMg2 F44	470	380	19	435	310	19	310	250	17	180	130	27	75	60	55	50	40	75
AlCuSiMn F46	480	410	13	435	395	15	275	240	20	110	90	38	65	50	52	45	35	65
AlZnMgCu1.5 F53	570	500	11	485	450	14	215	185	30	110	90	55	75	60	65	55	45	70

Příloha 3

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

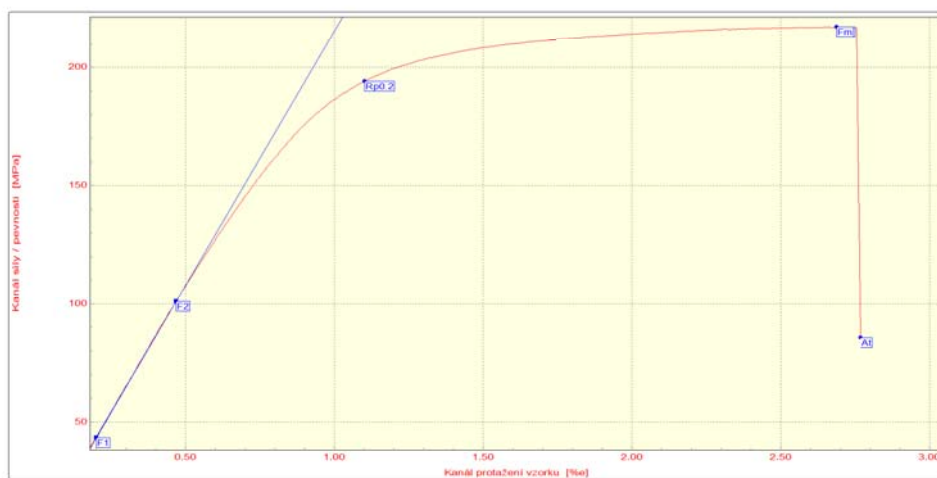
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : - 40°C
Norma: : ČSN 420313
Rozměr vzorku: : (0,07 x 20)mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Vypracoval: : Kamil Hlinka
Datum zkoušky: : 8.12.2010
Směr odebrání vzorku : ---

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
1	193.99	217.12
2	187.01	218.03
3	195.89	217.62
4	199.25	219.43
5	201.65	218.08

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa
Průměrná hodnota	195.56	218.05
Směrodatná odchylka	5.62	0.86



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 4

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

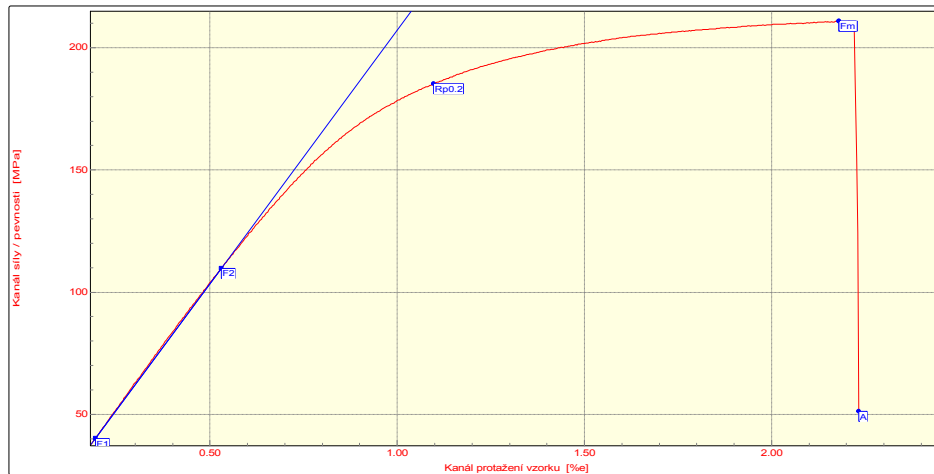
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : - 20°C
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,07 x 20)mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Výpracoval: : Kamil Hlínka
Datum zkoušky: : 8.12. 2010
Směr odebrání vzorku: : —

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
1	185.28	210.82
2	195.76	211.69
3	197.99	214.01
4	197.60	213.44
5	196.07	215.80

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa
Průměrná hodnota	194.54	213.15
Směrodatná odchylka	5.26	1.96



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 5

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

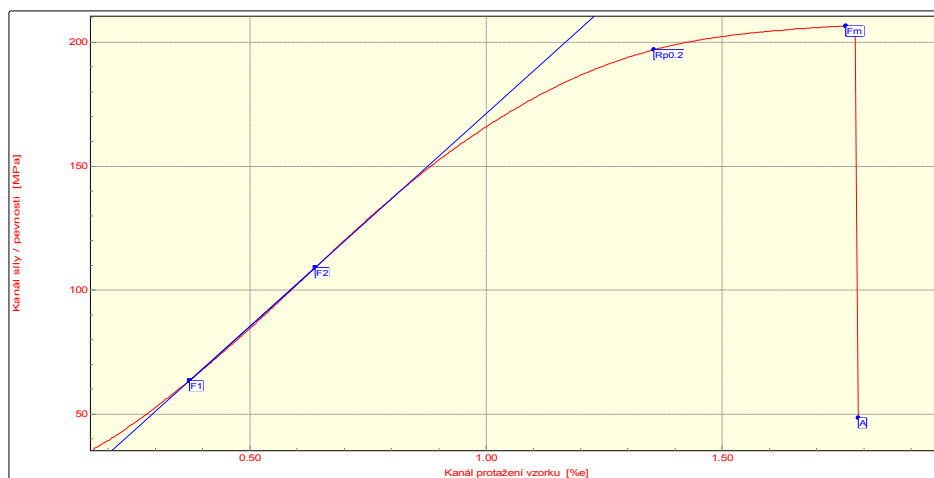
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : - 0°C
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,07 x 20)mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Vypracoval: : Kamil Hlinka
Datum zkoušky: : 8.12.2010
Směr odebrání vzorku: : ---

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
1	196.93	206.46
2	186.85	208.67
3	186.59	207.36
4	163.52	182.43

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa
Průměrná hodnota	183.47	201.23
Směrodatná odchylka	14.15	12.56



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 6

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

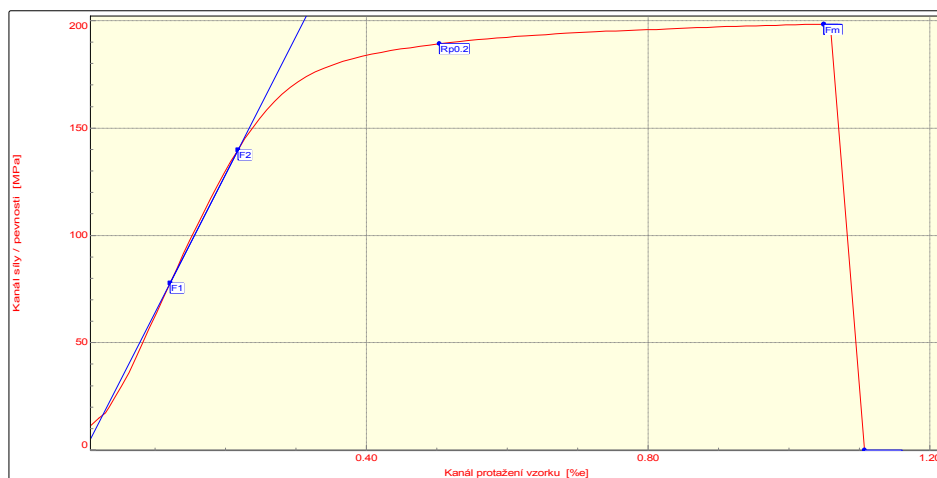
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : + 20°C
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,06 x 20)mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Vypracoval: : Ing. Pavel Doubek, Ph.D.
Datum zkoušky: : 27.11. 2009
Směr odebrání vzorku : ---

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
1	189.20	198.33
2	189.60	198.97
3	187.63	198.95
4	189.32	197.22
5	188.92	199.38

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa
Průměrná hodnota	188.93	198.57
Směrodatná odchylka	0.77	0.85



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 7

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

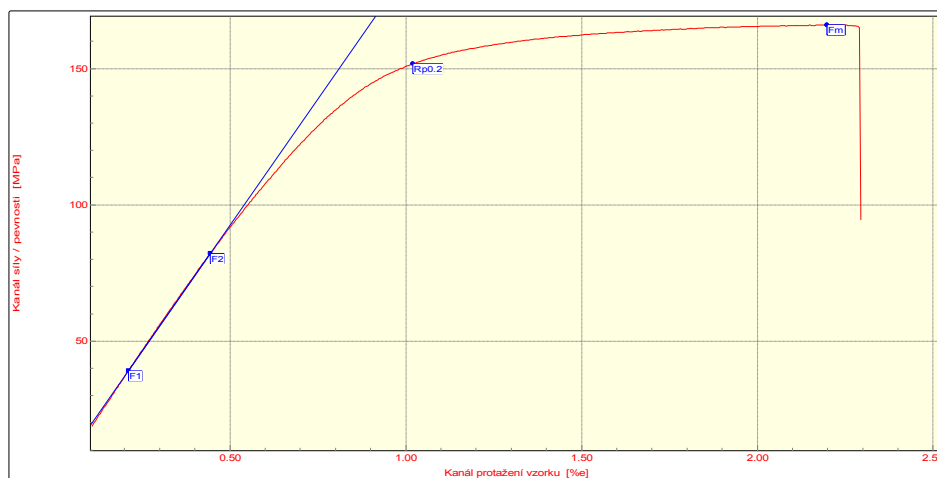
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : +40 °C
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,07 x 20)mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Vypracoval: : Kamil Hlinka
Datum zkoušky: : 8.12. 2010
Směr odebrání vzorku : ---

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
1	151.79	166.04
2	151.63	166.84
3	153.51	167.68
4	149.99	165.25

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa
Průměrná hodnota	151.73	166.45
Směrodatná odchylka	1.44	1.04



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 8

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

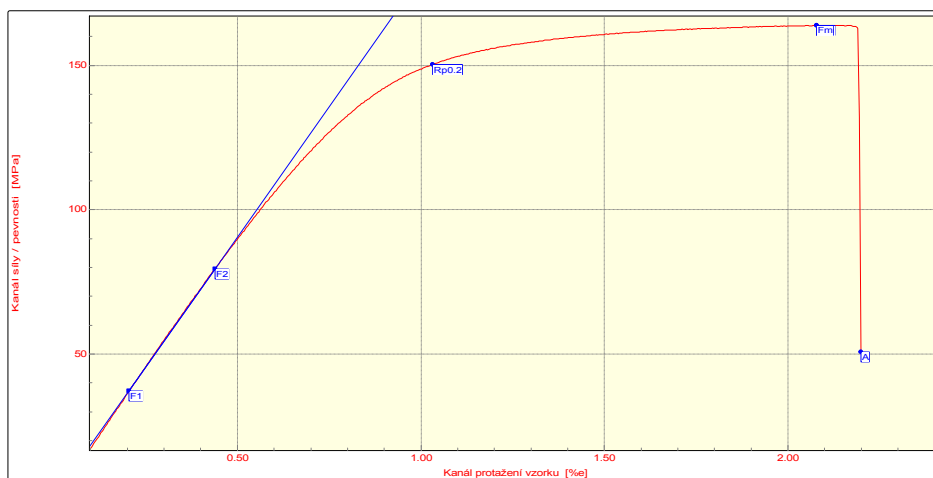
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : + 60°
Norma: : ČSN - EN 10002-1
Rozměr vzorku: : (0,07 x 20)mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Vypracoval: : Kamil Hlinka
Datum zkoušky: : 8.12.2010
Směr odebrání vzorku: : ---

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
1	150.33	163.90
2	148.70	162.77
3	144.58	160.36
4	148.10	162.54
5	149.90	163.43

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa
Průměrná hodnota	148.32	162.60
Směrodatná odchylka	2.28	1.36



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Příloha 9

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

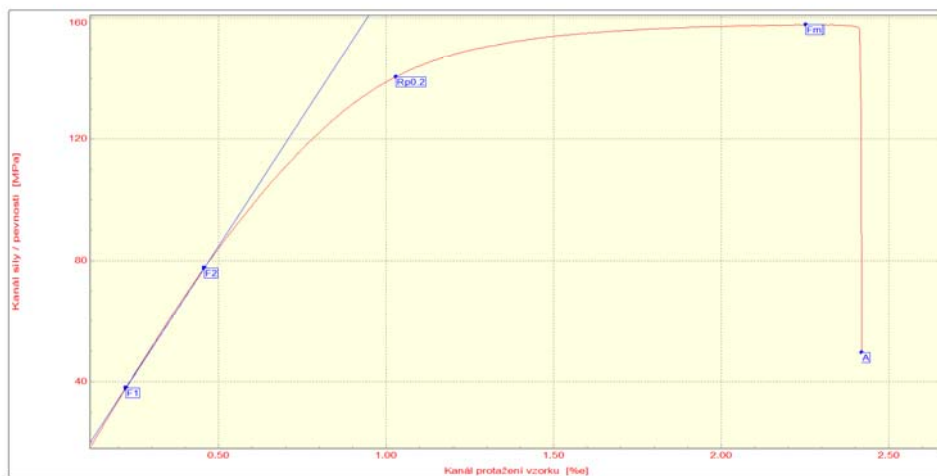
VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : + 80°
Norma: : EN ISO 6892 -2
Rozměr vzorku: : (0,07 x 20)mm
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min.
Vypracoval: : Kamil Hlinka
Datum zkoušky: : 8.12.2010
Směr odebrání vzorku : ---

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa
1	140.57	157.86
2	138.52	151.86
3	141.64	156.25
4	134.71	151.39

Statistická hodnota	Rp0.2 MPa	Rm MPa
Průměrná hodnota	138.86	154.34
Směrodatná odchylka	3.05	3.21



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnou-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 5. 6. 2009

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I use inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Datum: 5. 6. 2009

Signature: